

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE QUITO**

**CARRERA DE:
INGENIERÍA MECÁNICA**

**Trabajo de titulación previo a la obtención del título de:
INGENIEROS MECÁNICOS**

**TEMA:
PARAMETRIZACIÓN PREDICTIVA DEL ACABADO SUPERFICIAL EN EL
FRESADO CONVEXO MEDIANTE LA APLICACIÓN DE LOS MÉTODOS
ESTADÍSTICOS TAGUCHI - ANOVA EN EL ACERO M201**

**AUTORES:
BRYAN ALEJANDRO MENDOZA FIGUEROA
VICTOR GONZALO SÁNCHEZ ALMEIDA**

**TUTOR:
LUIS CHRISTIAN JUIÑA QUILACHAMÍN**

Quito, septiembre del 2020

CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR

Nosotros, Bryan Alejandro Mendoza Figueroa y Victor Gonzalo Sánchez Almeida con documentos de identificación N.º 172542647-0 y N.º 172462234-3, respectivamente, manifestamos nuestra voluntad y cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del trabajo de titulación: “PARAMETRIZACIÓN PREDICTIVA DEL ACABADO SUPERFICIAL EN EL FRESADO CONVEXO MEDIANTE LA APLICACIÓN DE LOS MÉTODOS ESTADÍSTICOS TAGUCHI - ANOVA EN EL ACERO M201”, mismo que ha sido desarrollado para optar por el título de Ingenieros Mecánicos, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En aplicación a lo determinado en la Ley de Propiedad Intelectual, en nuestra condición de autores nos reservamos los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscribimos este documento en el momento que hacemos entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, septiembre del 2020.



Bryan Alejandro Mendoza Figueroa
C.I. 172542647-0

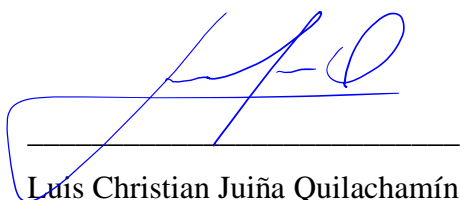


Victor Gonzalo Sánchez Almeida
C.I. 172462234-3

DECLARATORIA DE COAUTORÍA DEL DOCENTE TUTOR

Yo declaro que bajo mi dirección y asesoría fue desarrollado el Proyecto Técnico, “PARAMETRIZACIÓN PREDICTIVA DEL ACABADO SUPERFICIAL EN EL FRESADO CONVEXO MEDIANTE LA APLICACIÓN DE LOS MÉTODOS ESTADÍSTICOS TAGUCHI - ANOVA EN EL ACERO M201” realizado por Bryan Alejandro Mendoza Figueroa y Victor Gonzalo Sánchez Almeida, obteniendo un producto que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana, para ser considerado como trabajo final de titulación.

Quito, septiembre del 2020.



Luis Christian Juíña Quilachamín

C.I. 171370450-8

DEDICATORIA

A mis padres, por su sacrificio, amor y apoyo en todo momento; a mis hermanos que cuando necesitaban de ayuda en algo, yo también aprendía; a mis buenos amigos que he conocido a lo largo de mi vida; y, a todo aquel que me brindó su ayuda... ¡Gracias a ustedes, soy lo que soy!

Bryan Mendoza

El presente Trabajo de Titulación está dedicado, con un gran cariño, a mis padres, hermanos y a cada una de las personas que han contribuido tanto en mi crecimiento personal como académico. Así también dedico este trabajo a todas aquellas personas que me dieron su apoyo incondicional, pues gracias a cada una de ellas, tengo el gusto de culminar otro peldaño en mi vida.

Victor Sánchez

AGRADECIMIENTO

Agradecemos a las autoridades y a los docentes que forman parte de la Carrera de Ingeniería Mecánica de la Universidad Politécnica Salesiana por habernos transmitido sus conocimientos de la mejor manera posible. Al Ingeniero Christian Juiña, quien fue tutor de este Proyecto de Técnico... le agradecemos, de manera especial, por su guía y paciencia en el desarrollo de la presente investigación.

Bryan Mendoza y Victor Sánchez

ÍNDICE

CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR.....	i
DECLARATORIA DE COAUTORÍA DEL DOCENTE TUTOR.....	ii
DEDICATORIA	iii
AGRADECIMIENTO.....	iv
ÍNDICE	v
RESUMEN.....	xiv
ABSTRACT.....	xv
INTRODUCCIÓN	xvi
CAPÍTULO I.....	1
PRECEDENTES	1
1.1. Planteamiento del problema.....	1
1.2. Justificación.....	2
1.3. Grupo objetivo	2
1.4. Objetivos	2
1.4.1. General	2
1.4.2. Específicos.....	2
1.5. Importancia económica del acero en el Ecuador.....	3
1.6. Acero M201	3
1.6.1. Especificaciones del acero M201	3
1.6.2. Rangos de composición química del acero M201	3
1.6.3. Propiedades físicas y mecánicas del acero M201.....	4
1.6.4. Aplicaciones acero M201	4
1.7. Acero AISI 420	5
1.7.1. Especificaciones del acero AISI 420	5
1.7.2. Composición Química del acero AISI 420.....	5
1.7.3. Propiedades físicas y mecánicas del acero AISI 420	5

1.7.4. Aplicaciones del acero AISI 420	6
1.8. Similitudes entre los aceros M201 y AISI 420	6
1.9. Influencia de los materiales aleantes	7
1.10. Fundamentos de corte por arranque de viruta	7
1.10.1. Principios de maquinado	7
1.10.2. Maquinado convencional por arranque de viruta	9
1.11. Herramientas de corte para fresado	9
1.11.1. Herramientas de corte aplicadas al fresado convexo	9
1.11.2. Materiales aplicados para las HCs	10
1.12. Parámetros de mecanizado aplicados al fresado	12
1.12.1. Avance de mesa	12
1.12.2. Velocidad de corte	13
1.12.3. Velocidad del husillo	13
1.13. Procesos CAD/CAM.	13
1.13.1. Introducción al CAD /CAM	13
1.13.2. Diseño Asistido por Computadora	14
1.13.3. Manufactura asistida por computadora	14
1.14. Operaciones de mecanizado	14
1.14.1. Desbaste	14
1.14.3. Acabado	15
1.14.4. Súper - acabado	15
1.15. Fluidos de corte	15
1.16. Proceso de fresado	16
1.16.2. Manejo de fresado por control numérico	16
1.17. Estrategias de mecanizado CNC aplicado al fresado convexo	17
1.18. Rugosidad superficial	18
1.18.1. Rugosidad promedio (Ra)	18

1.18.2. Rugosidad media cuadrática (R_{rms})	18
1.18.3. Rugosidad máxima (R_y).....	19
1.18.4. Altura de las irregularidades en 10 puntos (R_z)	19
1.18.5. Normativa ISO 1302 aplicado a la rugosidad superficial.....	20
1.18.6. Rugosidad Superficial teórica.....	20
1.18.7. Rugosidad Superficial Real	20
1.18.8. Correlación ($H_C - R_A$)	21
1.18.9. Instrumento de medición de rugosidad.....	21
1.19. Fundamentos del diseño experimental	22
1.19.1. Estructura general de un diseño experimental.....	22
1.20. Conceptos básicos de prueba de hipótesis	24
1.21. Distribuciones de probabilidad	24
1.21.1. Variables aleatorias discretas	24
1.21.2. Variables aleatorias continuas	25
1.21.3. Distribuciones de probabilidad continua	25
a. Distribución normal.....	25
b. Distribución exponencial.....	26
c. Distribución rectangular	27
d. Distribución beta	28
e. Distribución triangular.....	30
1.22. Prueba de Kolmogorov – Smirnov.....	31
1.23. Método estadístico Taguchi	32
1.23.1. Arreglo ortogonal (OA).....	34
1.23.2. Criterios de selección de una matriz de Prueba.....	35
1.24. Método estadístico ANOVA	36
1.24.1. Términos, notaciones y desarrollo del análisis de varianza	36
a. Número de ensayos.....	36
b. Grados de libertad.....	36
c. Suma de cuadrados	37

d. Varianza.....	38
e. Suma de error de cuadrados	38
f. Razón de Varianza.....	39
g. Contribución porcentual	39
CAPÍTULO II	40
METODOLOGÍA	40
2.1. Equipos e instrumentos	40
2.1.1. Centro de mecanizado	40
2.1.2. Instrumentos de medición.....	41
2.2. Herramientas de corte	42
2.2.1. Herramienta de corte para operación de desbaste primario.....	42
2.2.2. Herramienta de corte para operación de desbaste secundario	43
2.2.3. Herramienta de corte para operaciones de acabado	43
2.2.4. Especificaciones del material de las (HCs)	44
2.3. Metodología de selección del arreglo ortogonal	45
2.4. Factores y niveles influyentes	45
2.4.1. Definición de niveles.....	46
2.5. Presentación de los resultados experimentales	46
CAPÍTULO III.....	48
ANÁLISIS Y RESULTADOS.....	48
3.1. Aplicación de las distribuciones probabilísticas	48
3.2. Modelación de los resultados teóricos	54
3.3. Aplicación del método Taguchi	55
3.4. Análisis comparativos	56
3.5. Desarrollo del método estadístico ANOVA.....	63
3.5.1. Grados de libertad.....	64
a. Grados de libertad totales	64
b. Grados de libertad para factores	64
c. Grados de libertad para el error	64

3.5.2. Suma de cuadrados totales.....	64
3.5.3. Varianza.....	65
3.5.4. Suma de error de cuadrados	65
3.5.5. Razón de varianza.....	66
3.5.6. Contribución porcentual	66
3.6. Prueba de hipótesis.....	67
3.6.1. Hipótesis nula	67
3.6.2. Hipótesis alternativa	67
3.7. Análisis de resultados.....	67
3.8. Predicción de rugosidad superficial óptima	70
CONCLUSIONES	74
RECOMENDACIONES	75
REFERENCIAS.....	76
ANEXO	

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Principales procesos de remoción de material aplicados en sector industrial [20]	8
Figura 2. Ejemplo de un perfil de rugosidad para aplicar las ecuaciones 16 y 17 [18]	18
Figura 3. Altura de las irregularidades Rz [40]	19
Figura 4. Función de densidad de probabilidad de una variable aleatoria normal [54]	26
Figura 5. Gráficas de una distribución exponencial para $\lambda =4$; $\lambda =2$ y $\lambda =1$ [56].	27
Figura 6. Probabilidad de densidad de una distribución rectangular [57]	27
Figura 7. Modelos de curvas de una distribución beta [55]	29
Figura 8. Grafica representativa de la función de densidad de una distribución triangular [57].....	30
Figura 9. Pasos para aplicación de la técnica Taguchi en tres partes principales [68]	33
Figura 10. Ordenador jerárquico para selección de arreglos matriciales [70].	35
Figura 11. Rugosidad vs Velocidad de corte para la trayectoria Zigzag	56
Figura 12. Rugosidad vs. Velocidad de corte para la trayectoria Zigzag Concéntrico	57
Figura 13. Rugosidad vs. Velocidad de corte para la trayectoria Zigzag Radial	57
Figura 14. Rugosidad vs. Velocidad de corte y avance en 3D para la trayectoria Zigzag Radial	58
Figura 15. Rugosidad vs. Velocidad de corte y avance en 3D para la trayectoria Zigzag Concéntrico	59
Figura 16. Rugosidad vs. Velocidad de corte y avance en 3D para la trayectoria Zigzag	59
Figura 17. Diagrama de barras entre los datos de rugosidad teórica y los del modelo matemático para la estrategia zigzag radial	60
Figura 18. Diagrama de barras entre los datos de rugosidad teórica y los del modelo matemático para la estrategia zigzag concéntrico	61
Figura 19. Diagrama de barras entre los datos de rugosidad teórica y los del modelo matemático para la estrategia zigzag.....	62
Figura 20. Análisis del estadístico F para los 3 factores	69

Figura 21. Gráfica de las Medias del análisis de Taguchi	70
---	----

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Rangos de la constitución química del acero M201 [11]	3
Tabla 2. Propiedades físico - mecánicas del acero M201 [12].....	4
Tabla 3. Composición química del acero AISI 420 [15]	5
Tabla 4. Propiedades físicas y mecánicas del acero AISI 420 [15, 16]	5
Tabla 5. Comparación de propiedades entre el acero M201 y el AISI 420	6
Tabla 6. Propiedades de los compuestos aleantes del acero M201 [17]	7
Tabla 7. Fresas para desbaste y semidesbaste [23].	10
Tabla 8. Fresas para acabado y superacabado [23]	10
Tabla 9. Rasgos usuales de los materiales para HCs [24]	11
Tabla 10. Tipos, características y aplicaciones de los fluidos de corte [24]	16
Tabla 11. Estrategias de mecanizado aplicado al fresado convexo [38].....	17
Tabla 12. Correlación entre altura cúspide y la rugosidad superficial [44]	21
Tabla 13. Tipos de Rugosímetros, según su contacto [46].....	21
Tabla 14. Pautas generales para diseñar un experimento [48]	23
Tabla 15. Razones señal/ruido para los diferentes tipos de variables de respuesta [67]	32
Tabla 16. Factores y niveles para varios arreglos ortogonales [69]	35
Tabla 17. Especificaciones y características del centro de mecanizado empleado en la experimentación [72]	40
Tabla 18. Características generales del rugosímetro Mitutoyo SJ-210 [73, 74]	42
Tabla 19. Dimensiones y especificaciones de HC para desbaste [75]	42
Tabla 20. Dimensiones y especificaciones de HC para desbaste secundario [75]....	43
Tabla 21. Dimensiones y especificaciones de HC para acabado [75].....	44
Tabla 22. Composición química y tamaño de grano del metal duro [76]	44
Tabla 23. Selección de los factores influyentes del diseño experimental	45
Tabla 24. Selección de los niveles del diseño experimental.	46
Tabla 25. Modelado de los Resultados experimentales [1].....	46
Tabla 26. Distribución Beta para el primer conjunto de datos de la trayectoria zigzag concéntrico	49
Tabla 27. Distribución Beta para el segundo conjunto de datos de la trayectoria zigzag concéntrico	49
Tabla 28. Distribución Beta para el tercer conjunto de datos de la trayectoria zigzag concéntrico	50

Tabla 29. Distribución Beta para el primer conjunto de datos de la trayectoria zigzag	51
Tabla 30. Distribución Beta para el segundo conjunto de datos de la trayectoria zigzag	51
Tabla 31. Distribución Beta para el tercer conjunto de datos de la trayectoria zigzag.	52
Tabla 32. Distribución Beta para el primer conjunto de datos de la trayectoria zigzag radial.....	52
Tabla 33. Distribución Beta para el segundo conjunto de datos de la trayectoria zigzag radial.....	53
Tabla 34. Distribución Beta para el tercer conjunto de datos de la trayectoria zigzag radial.....	53
Tabla 35. Datos teóricos obtenidos de las distribuciones probabilísticas	54
Tabla 36. Resultados teóricos obtenidos	55
Tabla 37. Porcentaje de error entre las cifras de rugosidad teórica y las obtenidas por el modelo matemático para la estrategia zigzag radial.....	61
Tabla 38. Porcentaje de error entre las cifras de rugosidad teórica y las obtenidas por el modelo matemático para la estrategia zigzag concéntrico	62
Tabla 39. Porcentaje de error entre las cifras de rugosidad teórica y las obtenidas por el modelo matemático para la estrategia zigzag.....	63
Tabla 40. Resultados del análisis de ANOVA	66
Tabla 41. Distribución F con 95% de confiabilidad o con 0,05 de nivel de significancia [82]	68
Tabla 42. Análisis de las medias mediante el método de Taguchi.....	69
Tabla 43. Parámetros para una rugosidad óptima en el acero M201	71

RESUMEN

En la presente investigación, se da a conocer los métodos y técnicas empleadas en el fresado convexo, para la optimización de la rugosidad superficial en el acero M201, a partir de los resultados experimentales de la investigación [1]: Análisis de rugosidad de una superficie convexa en función de los parámetros y estrategias de mecanizado para el acero AISI 420. Los factores que se utilizaron respectivamente para el análisis fueron tres: (A) las estrategias mecanizado zigzag concéntrico, zigzag y zigzag radial, (B) las velocidades de corte 100, 85 y 70 m/min y (C) los avances por diente de 0.005, 0.10 y 0.15 mm/diente. Una vez obtenido los resultados teóricos a través de las distribuciones probabilísticas y ser validadas, mediante la prueba estadística de Kolmogorov – Smirnov; se prosiguió a usar el método estadístico Taguchi, con su respectivo arreglo ortogonal L27. Se debe mencionar que, en el arreglo mencionado los factores mantuvieron una interacción (A·B), (A·C) y (B·C), permitiendo que el análisis incremente su robustez. Las ecuaciones modeladas se obtuvieron mediante el uso de regresiones multilíneas. Además, las variables que influyeron directamente en la rugosidad del acero M201, según el análisis ANOVA fueron: 1) las estrategias de mecanizado con 92,47%, 2) las velocidades de corte con 0,8584% y 3) los avances por diente con 1,241%. Siendo las estrategias de mecanizado las más relevantes e influyentes en el mecanizado convexo. En las comparaciones de las medias a partir de los datos generados por medio de distribuciones estadísticas, se pudo evidenciar que, los parámetros de corte óptimos para el acero M201 son: la estrategia de mecanizado zigzag radial, una V_c de 70 m/min y un f_z de 0,05 mm/diente. Llegando a obtenerse un resultado de rugosidad teórica de 1,772 μm con una tolerancia de $\pm 0,5238 \mu\text{m}$.

Palabras clave: fresado convexo, optimización, factores, método, estrategias

ABSTRACT

In the present investigation, the methods and techniques used in convex milling for the optimization of surface roughness in M201 steel are disclosed, based on the experimental results of the investigation [1]: Roughness analysis of a convex surface in function of machining parameters and strategies for AISI 420 steel. The factors that will be used respectively for the analysis were three: (A) the concentric zigzag, zigzag and radial zigzag machining strategies, (B) the cutting speeds 100, 85 and 70 m / min and (C) the feed per tooth of 0.005, 0.10 and 0.15 mm / tooth. Once the theoretical results have been obtained through the probabilistic distributions and have been validated by means of the Kolmogorov - Smirnov statistical test; The Taguchi statistical method was continued, with its respective L27 orthogonal arrangement. It should be mentioned that, in the aforementioned arrangement, the factors maintained an interaction (A · B), (A · C) and (B · C), allowing the analysis to increase its robustness. The modeled equations were obtained through the use of multilinear regressions. In addition, the variables that directly influenced the roughness of the M201 steel, according to the ANOVA analysis were: 1) the machining strategies with 92, 47%, 2) the cutting speeds with 0.8584% and 3) the advances per tooth with 1,241%. Being the machining strategies the most relevant and influential in convex machining. In the comparisons of the means from the data generated by means of statistical distributions, it could be seen that the optimal cutting parameters for M201 steel are: the radial zigzag machining strategy, a V_c of 70 m / min and a f_z of 0.05 mm / tooth. A theoretical roughness result of 1,772 μm with a tolerance of $\pm 0.5238 \mu\text{m}$ was obtained.

Keywords: convex milling, optimization, factors, method, strategies

INTRODUCCIÓN

En los últimos años las industrias del Ecuador han ido implementado nuevas técnicas y metodologías en los procesos de producción y manufactura; en búsqueda de realzar su impacto en el mercado internacional. En términos de producción cualquier condición o parámetro que no alcance o supere las expectativas del consumidor, no será adquirido por el sector interesado [2].

Es por tal motivo que, las industrias productoras de plásticos, las pequeñas y medianas empresas poseedoras de centros de mecanizado y los especialistas en la fabricación de matrices y moldes ha inyección, se han visto en la necesidad *implementar modelos matemáticos y estadísticos* sumamente precisos para incrementar la calidad de sus productos, reducir tiempos de producción y elevar las ganancias netas.

Uno de los parámetros que en la actualidad se ha visto englobado en casi todas las áreas de manufactura es la rugosidad superficial, puesto que, al reducir este parámetro tanto en industrias, empresas y factorías, han logrado potenciar un gran número de procesos como: la uniformidad en la inyección de plástica, el incremento en la precisión del mecanizado de superficies con un alto grado de complejidad, la disminución las fallas ocasionadas por las imperfecciones en las superficies de trabajo, los tiempos de vida útil de matrices y moldes, la calidad en general.

En la investigación de Krishna et al. [3] señalan que aplicando los métodos estadísticos Taguchi y ANOVA se puede identificar los parámetros óptimos para el mecanizado del acero al níquel endurecido con aceite; en este caso la parametrización respectiva fue: una velocidad 685 rpm, un avance 45 mm/rev, una profundidad de corte de 1mm e insertos de carburo.

Por otra parte, Parashar et al. [4] mencionan que, aplicando los métodos estadísticos Taguchi y ANOVA en el acero EN19, y manteniendo la parametrización de una herramienta de carburo recubierta, una V_c de 26,9 m/min, un avance de mesa de 50 mm/min y pasadas constantes de 0,4 mm, se puede alcanzar valores mínimos de rugosidad de la superficial.

Maiyar et al. [5] al analizar los parámetros óptimos para el fresado del acero Inconel 718 Super Alloy indican que, para este material, los parámetros apropiados son: 75 m/min para la velocidad de corte, 0.06 mm/diente para la velocidad de avance y 0.4 mm para la profundidad de corte, estos datos fueron obtenidos utilizando la matriz ortogonal de Taguchi con el análisis relacional gris y ANOVA.

En el presente proyecto técnico procura formular una ecuación capaz de predecir y parametrizar los acabados superficiales en los procesos de manufactura por control numérico computarizado en el fresado convexo; mediante los métodos estadísticos Taguchi y ANOVA. A su vez con esta ecuación se dará a conocer las variables que directamente afectan a la fabricación de este tipo de superficies; aportando de manera significativa la estandarización en la producción de matrices y moldes a inyección en el medio local.

El alcance de la investigación propuesta se direcciona a todos los operarios y maquinistas que se hayan involucrados en el sector de manufactura de matrices y moldes a inyección, así como las industrias de mecanizado asistido por computadora que requieran de la fabricación de estos tipos de superficies. Los beneficiarios indirectos de esta investigación serán las industrias generadoras de plásticos y cauchos.

CAPÍTULO I

PRECEDENTES

El presente capítulo, muestra todo lo relacionado al planteamiento del problema, justificación y objetivos, esta sección permite comprender de mejor manera los alcances, aportes y limitaciones que tendrá el proyecto técnico.

Luego de aquello, se da a conocer sobre la importancia del acero, sus características, propiedades, aplicaciones y diferencias entre el acero M201 y el AISI 420, es necesario conocer si dichos aceros poseen propiedades similares para posteriormente obtener los datos teóricos mediante las distribuciones probabilísticas. En esta sección también se presenta información sobre fundamentos de maquinado, herramientas de corte, rugosidad y distribuciones de probabilidad.

1.1. Planteamiento del problema

La fabricación de plásticos en el Ecuador ha tenido un fuerte impacto en el Producto Interno Bruto (PIB). Debido a esto, la manufactura de matrices y moldes a inyección se han visto en la obligación de parametrizar los procesos de acabados superficiales en curvas y formas complejas. Cabe señalar que, aún con las técnicas de diseño (CAD/CAM) de última generación, sigue siendo un desafío obtener resultados óptimos que permitan una repetitividad en la fabricación y construcción de los mismos [6, 7, 8].

Los proveedores de materiales para el diseño y construcción de moldes aportan ciertas recomendaciones con respecto a las técnicas y métodos a aplicar; de igual manera estas indicaciones no son suficientes para predecir de manera cuantitativa la rugosidad y el acabado superficial de las mismas, ocasionando irregularidades en la producción. Se debe agregar que la falta de reproducibilidad y repetitividad afectan directamente a las empresas que se dedican a la industrialización e intermediación comercial de productos plásticos y cauchos, disminuyendo la proyección de crecimiento del sector, en la matriz productiva.

1.2. Justificación

En el presente estudio se tiene como principal objetivo formular una ecuación capaz de predecir y parametrizar los acabados superficiales en los procesos de manufactura CNC para superficies cóncavas; mediante los métodos estadísticos Taguchi y ANOVA. A su vez con esta ecuación se prevé analizar las variables que directamente afectan a la fabricación de este tipo de superficies, aportando de manera significativa la estandarización en la producción de matrices y moldes a inyección en el medio local.

1.3. Grupo objetivo

Los beneficiarios directos de esta investigación son aquellos sujetos que se encuentran en el sector de manufactura de matrices y moldes a inyección, así como las industrias de mecanizado asistido por computadora que requieran de la fabricación de estos tipos de superficies. Los beneficiarios indirectos de esta investigación será las empresas dedicadas a la generación de plásticos y cauchos.

1.4. Objetivos

1.4.1. General

Parametrizar las variables influyentes en el acabado superficial del fresado convexo mediante la aplicación de los métodos estadísticos Taguchi y ANOVA en el acero M201.

1.4.2. Específicos

- Identificar las variables que afectan directamente a la rugosidad y el acabado superficial en el fresado CNC aplicado a las superficies convexas.
- Seleccionar las adecuadas estrategias de fresado CNC, así como las herramientas más óptimas para el análisis estadístico.
- Analizar las variaciones de la rugosidad mediante la modificación de los rangos y parámetros de las variables definidas mediante el método Taguchi.
- Establecer un modelo matemático predictivo capaz de anticipar el acabado superficial utilizando el método estadístico ANOVA.

1.5. Importancia económica del acero en el Ecuador

El acero en Ecuador se ha convertido en uno de los eslabones más importantes en la cadena siderúrgica y metalmecánica; generando un energético estrato económico en los múltiples sectores industriales. La siderurgia como área esencial en la generación de aceros, ha ido impulsado el desarrollo de proyectos de inversión en los sectores mineros hidrocarburíferos, de telecomunicaciones, eléctricos e hidroeléctricos. Así también, el área metalmecánica, con el desarrollo metalúrgicos, la tecnificación industrial y el ligero apoyo inversionista, ha logrado participar de manera activa en fabricación de materiales para la fabricación de partes de carrocerías, estructuras, tuberías y aceros en general [6, 9].

1.6. Acero M201

1.6.1. Especificaciones del acero M201

El acero M201 es un material especificado principalmente para la generación de matrices y moldes a inyección plástica. La maquinabilidad que presenta este material antes y después del tratamiento térmico, la buena estabilidad dimensional y la admisión de tratamientos termoquímicos (nitrurado), el alto brillo después de su proceso de pulido; hacen a este material idóneo para el mecanizado de complejas superficies para el área de matricería [10]. Cabe mencionar que este material puede también ser utilizado tanto en el moldeo por soplado de plástico no corrosivo y moldeo por fundición a presión.

1.6.2. Rangos de composición química del acero M201

En la Tabla 1, se muestra los rangos porcentuales de cada uno de los compuestos que conforman a la aleación del acero M201. La concentración de cada uno de los elementos aleantes, puede variar según la norma rigente y el fabricante.

Tabla 1. Rangos de la constitución química del acero M201 [11]

Acero M201						
C	Si	Mn	S	Cr	Mo	P
0,28-0,4	0,2-0,8	0,6-1,5	0,05(máx.)	1,4-2,0	0,3-1,2	0,03(máx.)

*La composición química del acero M201 varía de acuerdo con su lugar de procedencia, fabricante y normativa rigente

1.6.3. Propiedades físicas y mecánicas del acero M201

Las propiedades físicas y mecánicas permiten determinar el comportamiento que un material tendrá al momento de ser sometido a las condiciones de trabajo requeridas, a su vez este será uno de los puntos de partida para establecer un diseño. En la generación de elementos mecánicos, estructuras o matrices, ya sean de inyección o de fundición, se debe analizar bajo diferentes consideraciones entre los cuales se encuentran: cargas máximas, esfuerzos, presiones y temperaturas a las cuales se verá sometido en su vida útil.

Con base en sus propiedades se podrá determinar funcionabilidad y viabilidad. En la Tabla 2. se especificarán las propiedades del acero M201.

Tabla 2. Propiedades físico - mecánicas del acero M201 [12]

Propiedades físicas @ 20 °C		
Densidad	7,85	kg/dm ³
Conductividad térmica	35	W/m·K
Calor específico	460	J/kg·K
Resistividad eléctrica	0,19	Ohm·mm ² / m
Módulo de elasticidad	210000	N/mm ²
Propiedades Mecánicas		
Dureza Brinell (típica)	300	HB
Dureza, Rockwell C (típico)	30	HRC
Resistencia a la tensión (máxima)	965-1030	MPa
Resistencia a la tensión (rendimiento)	827-862	MPa
Módulo de Elasticidad	190-210	GPa
Alargamiento a la rotura (en 50 mm)	20,00	%
Fuerza compresiva	862	MPa
Impacto Charpy (muesca en V)	27,1-33,9	J
Coefficiente de Poisson	0,27-0,30	

1.6.4. Aplicaciones acero M201

Según las especificaciones de varias empresas encargadas de la distribución de aceros, mencionan que, el acero M201 es utilizado esencialmente como base para moldes de inyección, soplado y vertido a presión de aleaciones no férreas como plomo, estaño y zinc [11]. Este material puede ser aplicado para moldeo por compresión, porta moldes, piezas de apoyo y piezas para la construcción de maquinaria [13].

1.7. Acero AISI 420

En la presente sección se prosigue a mostrar la composición química del acero AISI 420, al igual que, las características y propiedades. Es importante mencionar que se podrá denotar ciertas diferencias con el acero M201, material base del proyecto técnico propuesto.

1.7.1. Especificaciones del acero AISI 420

El acero AISI 420 es material de naturaleza martensítica en su fabricación recibe un temple por precipitación, se caracteriza por ser tenaz a la corrosión, ofrece una excelente tenacidad, firmeza al desgaste. Presenta características muy buenas en el mecanizado y pulido [14].

1.7.2. Composición Química del acero AISI 420

En la Tabla 3, se indican los valores porcentuales de los distintos compuestos que conforman a la aleación del material AISI 420. La concentración de cada uno de los elementos aleantes, puede variar según la norma rigente.

Tabla 3. Composición química del acero AISI 420 [15]

Acero AISI 420					
C	Si	Mn	Ni	Cr	Mo
0,27	0,3	0,65	0,85	14,5	1,00

*La composición química del acero AISI 420 varía de acuerdo con su lugar de procedencia, fabricante y normativa rigente

1.7.3. Propiedades físicas y mecánicas del acero AISI 420

En la Tabla 4, se indican las propiedades de mayor relevancia del acero AISI 420, dichas propiedades permiten conocer el comportamiento que un material tendrá al momento de ser sometido a las condiciones de trabajo requeridas.

Tabla 4. Propiedades físicas y mecánicas del acero AISI 420 [15, 16]

Propiedades físicas @ 20 °C		
Densidad	7,7	kg/dm ³
Conductividad térmica	22,8	W/m·K
Capacidad calorífica	460	J/kg·K

Resistividad eléctrica	0,595	Ohm·mm ² / m
Módulo de elasticidad	218000	N/mm ²
Propiedades Mecánicas		
Dureza Brinell (típica)	290-330	HB
Módulo de Elasticidad	218	GPa

1.7.4. Aplicaciones del acero AISI 420

El acero AISI 420 presenta aplicaciones en la generación de moldes de inyección a elevadas presiones, moldes de compresión, moldes para polímeros, moldes para producción de bridas, métodos de desagüe en caliente [14].

1.8. Similitudes entre los aceros M201 y AISI 420

Los aceros M201 Y AISI 420 presentan algunas aproximaciones en sus propiedades físicas, químicas y mecánicas. Se debe mencionar que, la dureza, el módulo de elasticidad y sobre todo la maquinabilidad son parámetros fundamentales a la hora de generar un mecanizado eficaz. En la Tabla 5 se evidencian los valores cercanos entre estos dos aceros.

Tabla 5. Comparación de propiedades entre el acero M201 y el AISI 420

Propiedades mecánicas		
Dureza Brinell (típica)	300 HB	310 HB
Módulo de Elasticidad	200 GPa	218 GPa
Valor de maquinabilidad	3	4
Avance	Hasta 0., mm/diente	Hasta 0,2 mm/diente
Velocidad de corte	75 hasta 100 m/min	60 hasta 100 m/min

*En datos donde mostraban un rango se realizó un promedio y los rangos de maquinabilidad se encuentran evaluados de la siguiente manera (1 = malo - 10 = bueno)

Como se observa en la Tabla 5, las características varían significativamente unas de otras, con excepción de los elementos constituyente que se muestran en las Tabla 1 y Tabla 3. Esto es debido a que cada uno de estos materiales buscan un mejor rendimiento frente a los factores de trabajo a los que sean sometidos, por lo que es de esperarse que sus características no sean totalmente idénticas, aun así, estos dos materiales presentan propiedades bastante próximas entre sí.

1.9. Influencia de los materiales aleantes

Los materiales aleantes, son aquellos elementos químicos que, al introducirse en la aleación, influyen directamente en las propiedades y comportamiento. En la Tabla 6 se especifican algunos de los metales aleantes que se pueden encontrar en un acero.

Tabla 6. Propiedades de los compuestos aleantes del acero M201 [17]

Compuestos aleantes	Propiedades otorgadas
Carbono (C)	Acrecienta la resistencia a la tensión y dureza excelente comportamiento frente la abrasión y desgaste.
Silicio (Si)	Facilita la desoxidación y desgasificación, elevando de manera considerable la resistencia a la tensión, aportando dureza.
Manganeso (Mn)	Elemento aplicado principalmente como agente de desoxidación y desulfuración en las aleaciones.
Azufre (S)	Aporta excelsas propiedades de maquinado. Otorga la resistencia a la tensión. Reduce la propensión de inestabilidad, incrementando la facilidad de cementado.
Cromo (Cr)	Directamente proporciona una buena tolerancia a la tensión, proporcionalmente eleva la dureza. Otorga resistencia a la corrosión y a la oxidación.
Molibdeno (Mo)	Extiende la dureza y tenacidad, manteniendo la dureza de la aleación a temperaturas elevadas.
Fósforo (P)	Permite proveer un buen maquinado a la aleación, el lado negativo presente de este elemento de aporte, es la fragilidad que ocasiona

1.10. Fundamentos de corte por arranque de viruta

1.10.1. Principios de maquinado

El maquinado es un término muy basto para describir la remoción de material de una pieza [18], en esta operación de mecanizado se usa una herramienta de corte para quitar el material excedente de una pieza de trabajo, de manera que, el material restante tenga

las dimensiones y forma requeridas. El trabajo predominante del corte implica la deformación cortante del material de trabajo para formar la viruta, pero, luego de removida la viruta queda expuesta una nueva superficie [19].

Los procesos de maquinado han abarcado grandes áreas en el sector industrial; estos mismos procesos, se han tecnificado con el pasar de los años. En la Figura 1 se muestra los principales métodos para la remoción de material. Se debe mencionar que, estos procesos son una familia de operaciones de formado, cuyo eje más significativo, es el maquinado convencional, en donde una herramienta de corte se esgrime para remover maquinamente el material y así alcanzar la forma predefinida. Los procesos de mayor influencia e importancia en maquinado son el torneado, el taladrado y el fresado, en este grupo también se incluyen los procesos relacionados al perfilado, cepillado, escariado y aserrado [20].

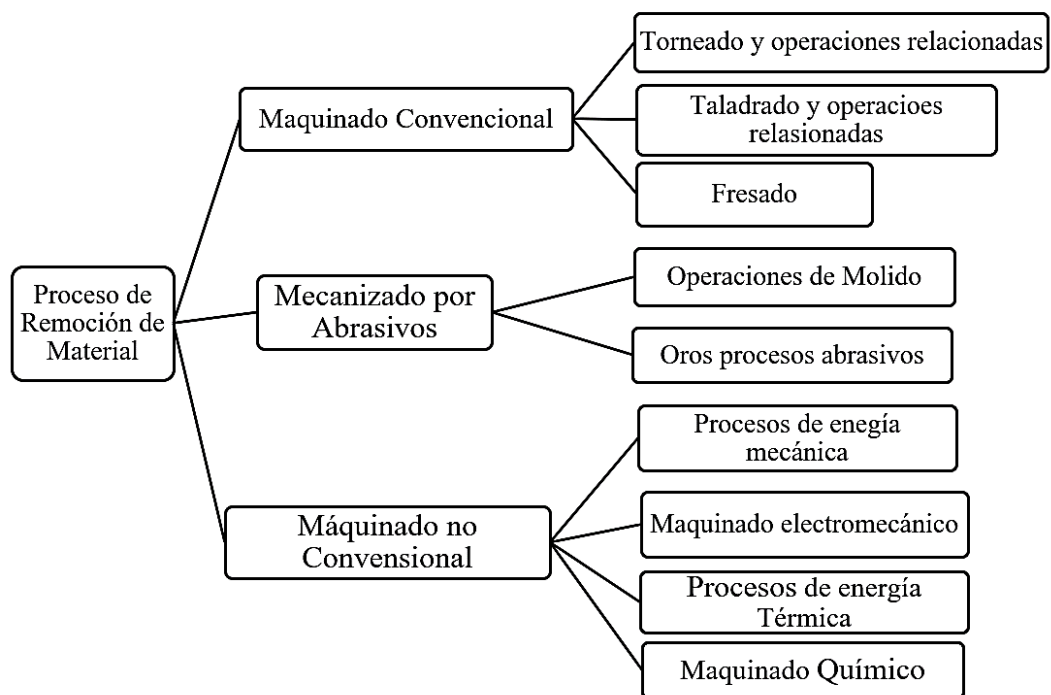


Figura 1. Principales procesos de remoción de material aplicados en sector industrial [20]

El maquinado por abrasión generalmente describe procesos mediante los cuales el margen de mecanizado se elimina por una multitud de partículas o granos abrasivos angulares duros (también llamados granos), que pueden unirse o no para formar una herramienta de geometría definida.

1.10.2. Maquinado convencional por arranque de viruta

El desprendimiento de viruta, ocasionado por el maquinado, se caracteriza por hacer uso de una o varias herramientas de corte. Este proceso ocurre, debido al movimiento relativo entre la herramienta y elemento a mecanizar. Este desplazamiento relativo se obtiene a través de un movimiento primario, llamado la velocidad de corte, y un movimiento secundario, denominado el avance. La forma de la herramienta y su penetración en la superficie del trabajo, combinada con los movimientos ya mencionados, produce la forma y superficie deseada en material [19, 21].

Cabe recalcar que existen un gran número de procesos de maquinado convencional, de entre los cuales el taladrado, torneado y fresado son los principales, de estos mismos se originan otros procesos los cuales son adaptaciones o innovaciones que han ido surgiendo con el pasar de los años.

1.11. Herramientas de corte para fresado











Las operaciones de mecanizado que se realizan en el fresado, son a partir de un instrumento rígido rotativo; de uno o varios filos de corte. Los criterios de diseño para las herramientas de fresado son análogos a los que muestran las herramientas de torneado; exceptuando que en el fresado implica precauciones adicionales, debido a que, es un proceso de corte interrumpido [22].

1.11.1. Herramientas de corte aplicadas al fresado convexo

Fresas para desbaste y semidesbaste, son herramientas de corte especializadas en la remoción elevada de material. Estas (HCs) presentan una robustez y una alta tolerancia al desgaste. Herramientas con canales de profundidad variable (VFD, por sus siglas en inglés) y fresas de ranurar de punta esférica (BNE, por sus siglas en ingles), son utilizadas en las operaciones de desbaste y semidesbaste tanto para superficies curvas, radiales, como superficies convexas y cóncavas [23].

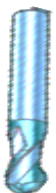
En la Tabla 7 se muestra las fresas de desbaste y semidesbaste más utilizadas para la generación de superficies curvas.

Tabla 7. Fresas para desbaste y semidesbaste [23]

Fresas desbaste y semidesbaste				
				
VFD radio de punta	BNE	Radio de punta	BNE	BNE
				
Radio	Toroidal	Redondas	Redondas	Radio

Por otra parte, existen un gran número de fresas que son utilizadas en el acabado y superacabado de superficies cóncavas y convexas. Entre las cuales se disponen de acero rápido y carburo de tungsteno (insertos). Estas pueden variar según el proveedor, o el grado de dificultad de las superficies. En la Tabla 8 se muestra algunas de las herramientas de corte, más utilizadas en el acabado de superficies curvas.

Tabla 8. Fresas para acabado y superacabado [23]

Fresas para acabado y superacabado					
					
VFD radio de punta	BNE	Radio de punta	BNE	BNE	Radio

1.11.2. Materiales aplicados para las HCs

Las herramientas de corte (HCs) suelen estar sometidas a temperaturas elevadas, esfuerzos de contacto excelsos, a rozamientos producidos por la herramienta de corte y al desprendimiento de viruta producida por la remoción. Por tal motivo, el material de las (HCs), debe poseer ciertas propiedades y particularidades, que permitan su máxima eficiencia ante los escenarios de trabajo [24].

En la Tabla 9 se muestran las características, modos de desgaste y limitaciones de las HCs.

Tabla 9. Rasgos usuales de los materiales para HCs [24]

Materiales HCs	Características generales	Modos de desgaste	Limitaciones
Aceros de alta velocidad	<ul style="list-style-type: none"> - Excelsa tenacidad - Resistencia a la cisura. - Amplio rango de desbaste y acabado. - Apto para cortes intermitentes. 	<ul style="list-style-type: none"> - Desgaste del flanco. - Craterización. 	<ul style="list-style-type: none"> - Descenso de la resistencia en caliente. - Limitada resistencia al deterioro.
Carburos no revestidos	<ul style="list-style-type: none"> - Tenacidad. - Tolerancia al desgaste. - Amplia gama de aplicaciones. 	<ul style="list-style-type: none"> - Desgaste del flanco. - Craterización. 	<ul style="list-style-type: none"> - No apto a bajas velocidades - Micro astillado.
Carburos revestidos	<ul style="list-style-type: none"> - Alta resistencia al desgaste. - Excelentes características térmicas y de fricción. 	<ul style="list-style-type: none"> - Deterioro del flanco. - Craterización. 	<ul style="list-style-type: none"> - No apto a bajas velocidades - Micro astillado.
Cerámicos	<ul style="list-style-type: none"> - Alta dureza a temperaturas elevadas. - Elevada al desgaste producido por abrasión. 	<ul style="list-style-type: none"> - Micro astillado - Fisura gruesa. 	<ul style="list-style-type: none"> - Mínima a la fatiga termo-mecánica.
Nitruro de boro cubico policristalino	<ul style="list-style-type: none"> - Tenacidad. - Alta resistencia en caliente. - Resistencia del filo de corte. 	<ul style="list-style-type: none"> - Astillado. - Oxidación. - Grafitización. 	<ul style="list-style-type: none"> - Mínima estabilidad química a temperaturas altas.

Diamante	- Elevada tenacidad.	- Astillado.	- Baja estabilidad química a temperaturas altas.
	- Resistencia al desgaste por abrasión.	- Oxidación.	

Cabe mencionar que, varios de los materiales aplicados para las herramientas de corte, presentados en la Tabla 9, suelen ser utilizados de igual manera para la elaboración de moldes y matrices en el área de fundición, formado y moldeado tanto en metales aleados, como en polímeros y elastómeros.

1.12. Parámetros de mecanizado aplicados al fresado

El fresado, al ser un proceso de mecanizado explícito en la generación de superficies mecanizadas, ya sean de una gran complejidad o no. Requiere de un minucioso y muy preciso arreglo en las variables de trabajo. Los criterios que se deben tomar en cuenta, antes de mecanizar el diseño previsto, son tanto el tipo de máquina - herramienta que se dispone, el material de trabajo requerido, el tipo de herramienta de corte y el acabado superficial, que se desea.

Un rasgo característico de este proceso es que cada diente de la herramienta de corte toma una porción del stock en forma de pequeñas virutas individuales, a continuación, se detallan los parámetros o fórmulas utilizadas comúnmente en el fresado [25].

Se debe añadir que, las formulaciones pueden variar sus nomenclaturas y unidades dependiendo la zona de desarrollo o las especificaciones del fabricante [23].

1.12.1. Avance de mesa

La velocidad a la que la pieza de trabajo se traslada, para la fresadora es la velocidad de avance o avance de mesa, se muestra en la Ecuación (1) y sus unidades son en mm/min [26].

$$V_f = f_z * n * Z_{EEF} \quad (1)$$

Donde, f_z es el avance por diente (mm/diente), n la velocidad del husillo (rpm) y Z_{EEF} número de insertos o de dientes efectivos.

1.12.2. Velocidad de corte

Se precisa como la velocidad lineal en el área de mecanizando. Una velocidad elevada de corte, permite ejecutar el mecanizado en un menor tiempo, acelerando consecuentemente el desgaste de la herramienta [27]. La velocidad de corte en la Ecuación (2) se expresa en m/min.

$$V_c = \frac{\pi * Dc * n}{1000} \quad (2)$$

Dc es el diámetro nominal de la fresa (mm) y n la velocidad del husillo (rpm).

1.12.3. Velocidad del husillo

Es la velocidad de rotación del portaherramientas, este es aquel que sujeta y conduce las diversas herramientas de corte [28]. La ecuación que, se presenta a continuación, se obtiene en revoluciones por minuto (rpm).

$$n = \frac{V_c * 1000}{\pi * Dc} \quad (3)$$

Las variables correspondientes de la Ecuación (3) son: V_c es la velocidad de corte (m/min) y Dc es el diámetro nominal de la fresa (mm).

1.13. Procesos CAD/CAM.

1.13.1. Introducción al CAD /CAM

Las aplicaciones de diseño y modelado de diseño asistido por computadora y manufactura asistida por computador (CAD/CAM, por sus siglas en inglés) [29], se emplean, para diseñar productos, elementos, ensambles y procesos de manufactura por control numérico computarizado.

Los softwares CAM utilizan diseños creados previamente en un software CAD, a su vez se emula los recorridos de herramientas configurando previamente los parámetros de corte y estrategias de mecanizado. Los softwares CAD/CAM se utiliza principalmente en el maquinado de prototipos complejos y piezas específicas [30].

1.13.2. Diseño Asistido por Computadora

Los diseños asistidos por computadora (CAD, por sus abreviaturas en inglés), pueden ser utilizados a través de lenguajes de programación o de paquetes aplicativos. El empleo de lenguajes de programación abiertos involucra tener gran dominio, conocimiento de las tecnologías, manejo del análisis matemático, geométrico y vectorial, opuestamente al uso de paquetes aplicativos que son fáciles de usar debido a su amplio desarrollo acelerado, su especialización en los diferentes campos de aplicación y el diseño de arquitectura abierta [29].

1.13.3. Manufactura asistida por computadora

La manufactura asistida por computadora, aplica el uso de ordenadores para dar un sustento eficaz en todas las fases de manufactura de un producto, este tipo de manufactura puede albergar la planificación del proceso, la elaboración del producto, el cronograma de entrega, la administración y control de calidad, con una minúscula mediación del operario [31].

1.14. Operaciones de mecanizado

1.14.1. Desbaste

El desbaste es una operación de maquinado, en donde se produce una remoción de material sumamente elevada, con el fin de eliminar el máximo volumen de material [32] . En este proceso, se obvia la calidad superficial y las tolerancias dimensionales, dejando un excedente de material.

En esta operación se busca alcanzar la forma del diseño original. Para la realización de un desbaste adecuado, se debe seleccionar herramientas de corte bajo algunos criterios: 1) Rigidez y potencia de la máquina, 2) Estabilidad del utillaje de amarre de

la pieza. 3) La herramienta y sus condiciones de corte. 4) La resistencia del portaherramientas [33].

1.14.2. Semi - acabado

Una vez que, se realiza el desbaste primario y se obtiene una geometría próxima a la del diseño, se prosigue con una operación de remoción de material más precisa y especializada. De acuerdo con los autores Chanataxi & Villacis [34] en su proyecto investigativo, señalan que, en las operaciones de semi - acabado se debe procurar dejar una superficie uniforme, con un excedente de material de 0.2 a 0.5 mm, antes de continuar con las operaciones de acabado y súper - acabado.

1.14.3. Acabado

En las operaciones de acabado, se procura una remoción de material ligera que, permita obtener un buen acabado superficial y las tolerancias precisas, denominadas (acabados dimensionales) [32]. Diferentes autores mencionan [35, 36] que, para lograr un buen resultado en el mecanizado es necesario tener en cuenta la precisión del centro de mecanizado, el tipo de herramienta de corte y sus condiciones de trabajo. Además, del abastecimiento de fluido de corte correcto.

1.14.4. Súper - acabado

En ciertas ocasiones, se requiere superficies con súper - acabados, este proceso se lo realiza usualmente mediante técnicas de mecanizado a alta velocidad, con una fresa de punta esférica o fresas especializadas para la ejecución de estas operaciones, las cuales permiten reducir o eliminar la necesidad de los pulidos manuales [23].

1.15. Fluidos de corte

Un fluido de corte, se manipulan generalmente en las operaciones de maquinado. Su correcto abastecimiento permite disminuir la fricción que se presenta entre la HCs y la superficie de trabajo, logrando generarse un enfriamiento efectivo en la zona de corte y alargando considerablemente la vida útil de las herramientas. Cabe mencionar que, además, los fluidos de corte previenen la corrosión de las superficies, mientras se encuentre en los procesos de remoción [24].

En la Tabla 10, se describen las particularidades y aplicaciones de algunos de los principales tipos de fluidos de corte.

Tabla 10. Tipos, características y aplicaciones de los fluidos de corte [24]

Tipos de fluidos de corte	
Aceites	<ul style="list-style-type: none"> - Conocidos comúnmente como aceites simples. - Se componen de aceites de origen mineral, animal, vegetal, combinados y de estructura sintetizada. - Se manipulan en ordenamientos de baja velocidad, donde el incremento de la temperatura no es representativo.
Emulsiones	<ul style="list-style-type: none"> - También llamadas aceites solubles. - Son una mezcla de aceite, agua y aditivos - Se emplean comúnmente en ordenamientos de alta velocidad, en donde el incremento de temperatura es significativo. - La presencia del H₂O hace que las emulsiones sean refrigerantes excelsos.
Semisintéticos	<ul style="list-style-type: none"> - Su presentación es emulsiones químicas, que contienen un porcentaje de aceite mineral diluido en agua con sus respectivos aditivos. - Las partículas de aceite son de menor tamaño, haciéndolas más eficaces a comparación de las emulsiones.
Sintéticos	<ul style="list-style-type: none"> - Se conforman de síntesis químicas, diluidos en agua y sin aceite.

1.16. Proceso de fresado

1.16.2. Manejo de fresado por control numérico

El término control numérico, es un término que frecuentemente es utilizado en las diferentes industrias metalmecánica. El control numérico, permite al operador comunicarse con la máquina herramienta a través de una serie de parámetros, números y símbolos, con un alto grado de precisión [37].

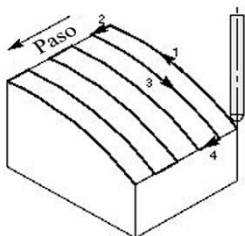
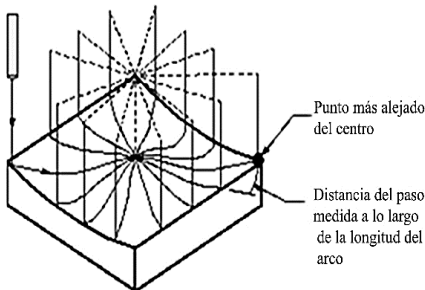
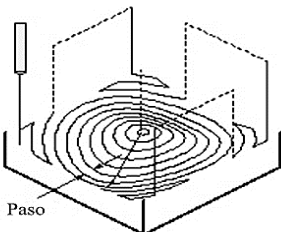
Por otra parte, y luego del requerimiento de una tecnificación más autónoma y precisa; llega a las industrias los sistemas (CNC). Su llegada, trajo consigo grandes avances y mejoras a la industria metalmecánica.

Las máquinas herramientas (CNC) han permitido a las empresas generar piezas con un alto grado de precisión, exactitud, una alta repetibilidad, con buenos acabados superficiales ya sea compleja o no la naturaleza del diseño [37].

1.17. Estrategias de mecanizado CNC aplicado al fresado convexo

Las trayectorias o patrones de corte aplicados en el desarrollo experimental de Dávalos y Landázuri [1], se indican en la Tabla 11, donde, además, se presenta una breve descripción de cómo es la trayectoria de cada una de las estrategias.

Tabla 11. Estrategias de mecanizado aplicado al fresado convexo [38]

Estrategias de mecanizado convexo	
Zigzag	 <p>Genera un paso Zig en una dirección, continua al siguiente paso mientras sigue cortando, y crea un paso Zag en dirección opuesta.</p>
Zigzag radial	 <p>Crea patrones de corte lineal que se extiendan desde un punto central óptimo. En el gráfico se muestra un Zig radial, pero, la diferencia con el Zigzag radial radica en que este no tiene ascensos.</p>
Zigzag concéntrico	 <p>Forma patrones de corte circular progresivamente más grandes o gradualmente más pequeños a partir de un punto central óptimo.</p>

1.18. Rugosidad superficial

La rugosidad superficial se puede considerar como ligeras irregularidades en la textura de la superficie, que generalmente son resultantes de la acción inherente del proceso de producción, como las marcas producidas durante el mecanizado [39].

1.18.1. Rugosidad promedio (Ra)

La rugosidad promedio se puede definir como la media aritmética de los valores cerrados de las coordenadas de los puntos del perfil de rugosidad en relación con la línea intermedia, dentro de la longitud de medición [40]. De acuerdo con Kalpakjian y Schmid [24] el modelo de ecuación para (Ra) es de la siguiente:

$$Ra = \frac{a + b + c + d + \dots}{n} \quad (4)$$

En donde, las ordenadas, a, b, c, ..., son aquellos valores cerrados y n es la cuantía de lecturas, esto se puede observar en la Figura 2.

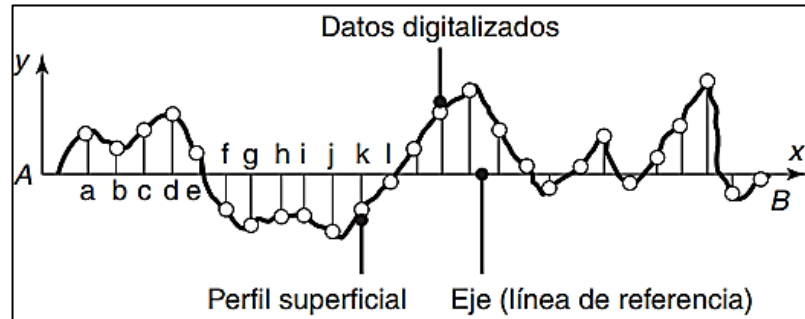


Figura 2. Ejemplo de un perfil de rugosidad para aplicar las ecuaciones 16 y 17 [18]

1.18.2. Rugosidad media cuadrática (Rrms)

La rugosidad media cuadrática o (Rrms, por sus siglas), se puede encontrar definido como la raíz cuadrada de la media de los cuadrados de las ordenadas del perfil efectivo con relación a la línea intermedia en un módulo de medición [40]. Kalpakjian y Schmid la plantean así [24]:

$$Rrms = \sqrt{\frac{a^2 + b^2 + c^2 + d^2 + \dots}{n}} \quad (5)$$

Donde todas las ordenadas, a, b, c, ..., son valores absolutos y n es la cantidad de lecturas, como se observa en la Figura 2.

1.18.3. Rugosidad máxima (Ry)

La rugosidad máxima, se considera como la distancia entre dos líneas paralelas a la línea media que contacta los puntos extremos superior e inferior del perfil dentro de la longitud de muestreo de rugosidad [39].

1.18.4. Altura de las irregularidades en 10 puntos (Rz)

En la Figura 3, la altura de las irregularidades en 10 puntos o también denominado (Rz, por sus siglas) consta de una distancia promedio entre los 5 picos más altos y 5 los valles más profundos dentro de la longitud de muestreo medida desde una línea paralela a la línea media y sin cruzar el perfil [39, 40].

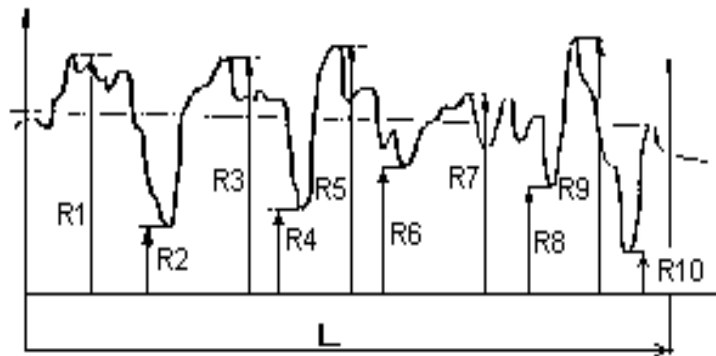


Figura 3. Altura de las irregularidades Rz [40]

La ecuación rigiente de la elevación de las irregularidades en 10 puntos (Rz) se expresa de la siguiente manera [39]:

$$R_z = \frac{(R_1 + R_3 + R_5 + R_7 + R_9) - (R_2 + R_4 + R_6 + R_8 + R_{10})}{5} \quad (6)$$

También esta ecuación se puede definir bajo el criterio de la diferencia de sumatorias de las cinco cumbres de mayor altura y los cinco valles más profundos, dividido para 5 partes, siendo otra manera de expresar la Ecuación (6).

1.18.5. Normativa ISO 1302 aplicado a la rugosidad superficial

La presente norma se detalla los lineamientos para la representación de la calidad superficial en una ficha técnica de productos (dibujos, especificaciones, contratos, informes, entre otros) mediante símbolos característicos e indicaciones textuales.

Existen una gran cantidad de reglas en esta normativa, pero la más significativa y la que se puede aplicar para este proyecto técnico es la siguiente: “Los símbolos de los parámetros se deben escribir en línea (por ejemplo, Ra y Rz). No se emplean inscripciones como R_a y R_z ” [41].

1.18.6. Rugosidad Superficial teórica

El tipo de operación de mecanizado, la geometría de la herramienta de corte, el radio de la punta y el avance, son parámetros previos, para proveer una aproximación de la rugosidad superficial ideal o teórica, obviando otros factores, como son el material de trabajo, las vibraciones o la máquina herramienta empleada [42]. La Ecuación (7) que se muestra a continuación, se puede aplicar en el torneado, fresado, perfilado [43].

$$Rst = \frac{32 \cdot f_z^2}{R} \quad (7)$$

Donde f_z es el avance por diente del cortador (mm/diente) y R el radio de la herramienta en mm y el resultado es en μm .

1.18.7. Rugosidad Superficial Real

Los valores reales de la rugosidad dependen de la precisión del rugosímetro. Las superficies, que parezcan a simple vista lisas, presentan marcas del método de mecanizado empleado, ya sea, torneado, bruñido, fresado, lapidado, rectificado, entre otras, se puede saber qué tipo de mecanizado se empleó debido a que cada uno presenta patrones característicos o conjunto de irregularidades de espaciamiento regular o irregular [40].

1.18.8. Correlación (H_C - R_A)

La altura de cúspide (H_C) y la rugosidad superficial (R_A), poseen una relación recíproca, en la cual, sabiendo una de las dos variables se puede obtener una aproximación de la otra [44].

La unidad rigente para esta correlación es (μm). En la Tabla 12, se presenta la correlación (H_C - R_A):

Tabla 12. Correlación entre altura cúspide y la rugosidad superficial [44]

Correlación H_C - R_A													
H_C (μm)	0,2	0,4	0,7	1,25	2,2	4	8	12,5	25	32	50	63	100
R_A (μm)	0,03	0,05	0,1	0,2	0,4	0,8	1,6	3,2	6,3	8	12,5	16	25

1) R_A es aproximadamente el 25% de H_C

1.18.9. Instrumento de medición de rugosidad

Los rugosímetros o medidores de rugosidad, son instrumentos de medida, empleados para medir las fallas de las superficiales. Se debe mencionar que las superficies lisas, aun pulidas presentan imperfecciones.

Los rugosímetros miden la microgeometría de las superficies, en síntesis, las imperfecciones y ondulaciones que presentan las superficies después de su fabricación [45]. En la Tabla 13 se tabulan los tipos de rugosímetro, estos se clasifican según el tipo de contacto y según el palpador.

Tabla 13. Tipos de Rugosímetros, según su contacto [46]

Tipos de Rugosímetros	
Según su tipo de contacto	
De contacto:	Tienen una punta llamada palpador, la cual se debe acercar y tocar levemente con la superficie.
Sin contacto:	Dirige un láser que es capaz de analizar la superficie.
Según su tipo de Palpador	

Palpador piezoeléctrico:	Al moverse sobre la superficie, modificara todo el producto piezoeléctrico generando una señal eléctrica.
Palpador inductivo:	Cambia el campo magnético y el flujo para generar una señal eléctrica.
Palpador capacitivo:	Modifica la capacidad del condensador y la señal eléctrica que envía.
De filtrado eléctrico:	Las señales serán tomadas por un filtro eléctrico que va a eliminar ondulaciones y datos necesarios.
Mixto:	Capaz de mezclar tanto el palpador con el láser funcionando como un amplificador de luz.
Con patín mecánico:	El patín es el encargado de registrar las irregularidades.

1.19. Fundamentos del diseño experimental

El diseño de experimentos o (DDE, por sus siglas en español), es un grupo de técnicas minuciosas activas, que permiten analizar, estructurar y efectuar un conjunto de pruebas con el objetivo de crear datos que, al ser analizados mediante modelos matemáticos y métodos estadísticos, proporcionen evidencias objetivas a las interrogantes planteadas por el experimentador sobre un determinado proceso o situación.

Unas de las características principales del (DDE) es su estructuración puramente activa, esto debido, a que, no espera a que el proceso envíe señales útiles, sino que éste se “manipula” para que provea la información que se requiere para su mejora [47].

1.19.1. Estructura general de un diseño experimental

En el diseño y análisis experimental, es necesario aplicar un enfoque estadístico en donde los involucrados en la investigación, tengan desde el principio una idea precisa de qué es puntualmente lo que va a estudiarse, cómo van a colectarse los datos, y al menos una razón cualitativa de la forma en que van a analizarse estos datos.

En la Tabla 14 se muestra las pautas básicas preliminares a seguir en un diseño experimental [48].

Tabla 14. Pautas generales para diseñar un experimento [48]

Nº	Criterio	Descripción
1.	Identificación y exposición del problema.	En este punto es la recolección de criterios, rangos establecidos y esperados, además de las posibles causas del problema.
2.	Elección de los factores, los niveles y los rangos.	Los factores potenciales del diseño son aquellos que el experimentador posiblemente quiera hacer variar en el experimento. Algunas clasificaciones, además de los factores potenciales son los factores de diseño, factores que se mantienen constantes y factores a los que se permite variar.
3.	Selección de la variable de respuesta.	Para seleccionar la variable de respuesta, el experimentador deberá tener la certeza de que esta variable proporciona en realidad información útil acerca del proceso bajo estudio. En la mayoría de los casos, el promedio o la desviación estándar (o ambos) de la característica medida será la variable de respuesta.
4.	Elección del diseño experimental.	La elección del diseño implica la consideración del tamaño de la muestra (número de réplicas), la selección de un orden de corridas adecuado para los ensayos experimentales y la determinación de si entran en juego o no la formación de bloques u otras restricciones sobre la aleatorización.
5.	Realización del experimento.	Cuando se lleva a cabo el experimento es vital monitorear con atención el proceso a fin de asegurarse de que todo se esté haciendo conforme a la planeación. Los errores en el procedimiento experimental en esta etapa destruirán por lo general la validez experimental.
6.	Análisis estadístico de los datos.	Deberán usarse métodos estadísticos para analizar los datos a fin de que los resultados y las conclusiones sean objetivos y no de carácter apreciativo. Si el experimento se ha diseñado correctamente y si se ha llevado a cabo de acuerdo con el diseño, los métodos estadísticos necesarios no deben ser complicados.
7.	Conclusiones y recomendaciones.	Una vez que se han analizado los datos, el experimentador debe sacar conclusiones prácticas acerca de los resultados y recomendar un curso de acción. Se recomienda ilustrar los resultados además de los datos ya obtenidos.

1.20. Conceptos básicos de prueba de hipótesis

La hipótesis en una investigación es un tipo de mención, sostenida por el investigador, manteniendo una posición sobre el resultado final de un ensayo. Constantemente las hipótesis se realizan a partir de ciertos elementos observados y un proceso de lógica inductiva.

En las investigaciones, se identifican dos tipos de hipótesis. Según Rodríguez [49], las hipótesis más frecuentes en análisis estadísticos son las siguientes: 1) Hipótesis nula (H_0): Supone la igualdad o que no existen diferencias entre dos variables comparadas. Se formula solo para rechazarla. 2) Hipótesis alternativa (H_1) Supone la desigualdad o la existencia de diferencias. Es el objetivo de la mayoría de las investigaciones y constituye una opción más arriesgada.

1.21. Distribuciones de probabilidad

Las distribuciones de probabilidad se consideran modelos de frecuencia teórica que, representa la tendencia en que se espera varíen los resultados. Este tipo de distribuciones representan la expectativa de que ocurra un suceso; proveyendo así, de modelos ventajosos para hacer inferencias y tomar decisiones en condiciones de incertidumbre [50].

Se debe indicar que, las distribuciones de probabilidad en la actualidad son herramientas altamente útiles para diseñar escenarios de acontecimientos futuros basados en muestreos de menor tamaño [51].

1.21.1. Variables aleatorias discretas

Una variable aleatoria es discreta, solo si, resulta evidente la diferencia entre el valor anterior y el que sigue, además, consiguen diferenciar sin lugar a duda dos valores contiguos. Las variables discretas también se denominan y conocen como variables discontinuas. Este tipo de variable, logra adjudicarse todo número finito de valores o a su vez una continuación infinita de valores, ya sean de naturaleza segura o aleatoria [52, 53].

1.21.2. Variables aleatorias continuas

Las variables aleatorias continuas, se caracterizan principalmente debido a que, entre sus valores no muestran una diferencia inmanente. Se debe mencionar que, sus valores consiguen medirse con una alta o muy elevada precisión para diferenciar entre sus valores [52].

1.21.3. Distribuciones de probabilidad continua

Las distribuciones continuas, presentan una condición en la cual sus resultados posibles solo se obtienen midiendo, no contando; posibilitando observaciones de una alta precisión en donde se pierde el contraste entre observaciones contiguas. En las distribuciones continuas, la posibilidad de que se muestre una cuantía específica es totalmente nula, es primordial conducir la probabilidad de que una medición explícita se encuentre en un rango de valores [52].

a. Distribución normal

Se denomina distribución de Gauss o distribución normal, esta distribución, es la más manejada en la estadística. Forma un vasto modelo para un gran número de poblaciones continuas, aunque no para todas [54].

Una variable aleatoria continua x , tiene una distribución normal bajo los parámetros de la desviación estándar y la media (o promedio aritmético) [55]. En la Ecuación (8) se exhibe el modelo de densidad de probabilidad.

$$f(x) = \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot e^{-(x-\mu)^2/2 \cdot \sigma^2} \quad (8)$$

Donde, μ es la media, σ es la desviación estándar, e y π son constantes. Y el rango del modelo de densidad de probabilidad de la distribución, se encuentra de $-\infty < x < \infty$. En la Figura 4 se presenta la campana del modelo de densidad de probabilidad normal o también denominada curva normal, con su respectivo promedio aritmético y desviación estándar.

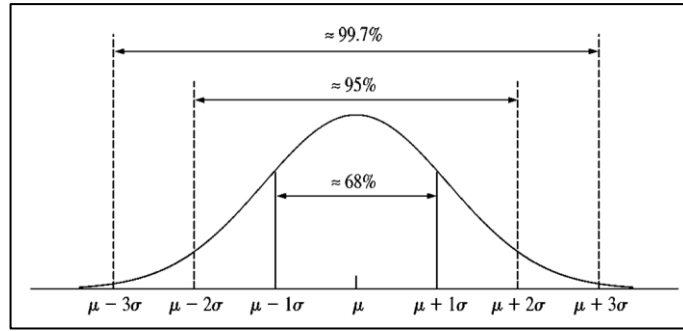


Figura 4. Función de densidad de probabilidad de una variable aleatoria normal [54]

Una distribución normal presenta una simetría próxima de μ , de manera que μ simboliza la mediana, así como la media. También, la población normal se define por presentar un 68% de una población en el intervalo $\mu \pm \sigma$, un 95% de la población se encuentra en el intervalo $\mu \pm 2\sigma$ y un 99.7% de la población se localiza en el intervalo $\mu \pm 3\sigma$ [54].

b. Distribución exponencial

Las distribuciones de probabilidad exponenciales proporcionan modelos de probabilidad bastante útiles en las disciplinas de ingeniería y ciencias [53, 55]. El modelo de densidad de probabilidad se presenta en la Ecuación (9):

$$f(x) = \frac{1}{\mu} \cdot e^{-\frac{x}{\mu}} \quad (9)$$

Donde, la variable x se encuentra en el rango mayor o igual a cero y μ es el valor esperado o media. Varios autores [55, 56, 57] en sus libros definen al modelo de densidad de probabilidad de la distribución exponencial con el parámetro de riesgo λ , siendo esta una alternativa sustituta a la para la función $f(x)$, este parámetro se denomina función de riesgo o tasa de riesgo:

$$\lambda = \frac{1}{\mu} \quad (10)$$

Con base en el replanteamiento del parámetro λ , presentado en la Ecuación (10), la función $f(x)$ se puede redefinir. Navidi [56] en su libro define el modelo de densidad de probabilidad de la distribución exponencial con ($\lambda > 0$), como:

$$f(x) = \begin{cases} \lambda \cdot e^{-\lambda \cdot x} & x > 0 \\ 0 & x \leq 0 \end{cases} \quad (11)$$

En la Figura 5 se indican las gráficas de la función de densidad de probabilidad exponencial para varios valores de λ .

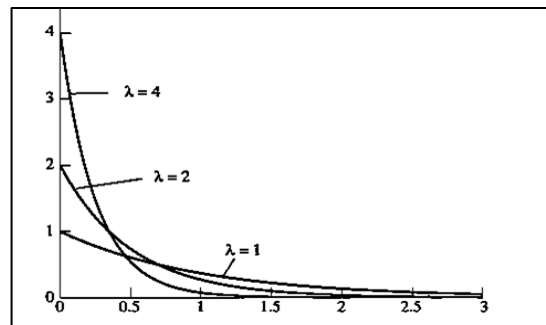


Figura 5. Graficas de una distribución exponencial para $\lambda=4$; $\lambda=2$ y $\lambda=1$ [56]

Cabe mencionar que este tipo de distribución se usa a menudo para modelar tiempos entre eventos regidos a procesos aleatorios de llegada y descomposición, pero generalmente no es apropiado para modelar los tiempos de retraso de dichos procesos [58].

c. Distribución rectangular

Se afirma que una variable aleatoria X mantiene una distribución rectangular (o uniforme), cuando su función de densidad $f(x)$ toma valores constantes en el intervalo $[a, b]$; permitiendo que, sea igualmente probable que ocurra cada valor en el rango de la distribución [57, 59]. En la Figura 6 se visualiza el esquema de una densidad de probabilidad de una distribución rectangular.

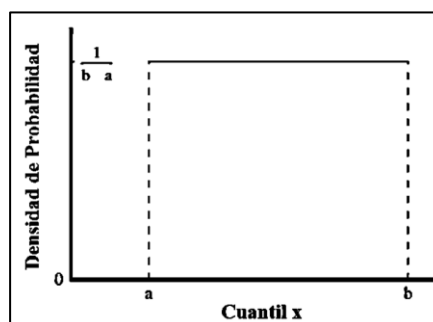


Figura 6. Probabilidad de densidad de una distribución rectangular [57]

La densidad de probabilidad de una distribución rectangular, según varias bibliografías [53, 58, 60] consta de la siguiente definición: Si $(a < b)$, una variable aleatoria x tiene distribución de probabilidad uniforme en el intervalo (a, b) si y sólo si la función de densidad de x , la Ecuación (12) es:

$$f(x) = \begin{cases} \frac{1}{b-a}, & a \leq x \leq b \\ 0, & \text{en cualquier otro punto.} \end{cases} \quad (12)$$

Si $(a < b)$ y \mathbf{X} es una variable aleatoria uniformemente distribuida en el intervalo (a, b) , entonces la varianza se define en la Ecuación (13):

$$\sigma^2 = \frac{(b-a)^2}{12} \quad (13)$$

Y la media, o esperanza matemática, de la distribución rectangular [59], se puede expresar como en la Ecuación (14):

$$\mu = \frac{a+b}{2} \quad (14)$$

La distribución rectangular, se utiliza cuando todos los valores en un rango finito se consideran igualmente probables. A veces se usa cuando no hay disponible otra información que no sea el rango. La distribución uniforme tiene una variación mayor que otras distribuciones que se usan cuando falta información [58]. Se debe mencionar que, esta distribución es ampliamente utilizado como base para la generación de números aleatorios para otras distribuciones estadísticas [57].

d. Distribución beta

La distribución beta es un modelo que tiene aplicaciones importantes, por las diferentes de formas que puede tomar su función de densidad, eligiendo valores para sus parámetros [61]. Esta distribución proporciona una densidad positiva sólo para x en un intervalo de longitud finita. Según Wackerly et al. [60] definen el rango de la distribución beta, como el intervalo cerrado de $(0 \leq x \leq 1)$. En la Ecuación (15) se presenta la función de densidad de probabilidad de la distribución beta.

$$f(x) = \begin{cases} \frac{x^{\alpha-1} \cdot (1-x)^{\beta-1}}{B(\alpha; \beta)}, & 0 \leq x \leq 1 \\ 0, & \text{en cualquier otro punto.} \end{cases} \quad (15)$$

Donde, $B(\alpha, \beta)$ es la función beta y los argumentos α y β , ambos positivos, son dados por la Ecuación (16):

$$B(\alpha, \beta) = \int_0^1 x^{\alpha-1} \cdot (1-x)^{\beta-1} \cdot dx \quad (16)$$

Si x es una variable aleatoria continua con una distribución beta y $\alpha > 0$ y $\beta > 0$ [61]. Entonces la media y la varianza se expresarán respectivamente de la siguiente manera:

$$\mu = \frac{\alpha}{\alpha + \beta} \quad (17)$$

Y

$$\sigma^2 = \frac{\alpha \cdot \beta}{(\alpha + \beta)^2 \cdot (\alpha + \beta + 1)} \quad (18)$$

Una distribución beta puede presentar diferentes tendencias y formas: si $\alpha < 1$ y $\beta < 1$ la forma de la distribución será una U. Si $(\alpha - 1) \cdot (\beta - 1) < 0$, tendrá la forma de J, caso contrario su forma será unimodal [57]. En la Figura 7 se muestra las curvas de densidad estándar de una distribución beta.

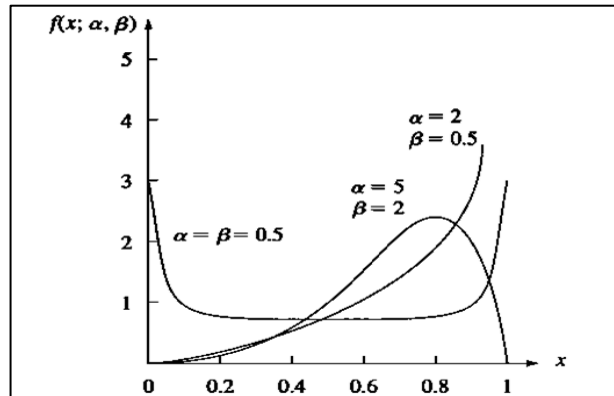


Figura 7. Modelos de curvas de una distribución beta [55]

Debido a su capacidad para adoptar una amplia variedad de formas, esta distribución a menudo se usa como un modelo aproximado en ausencia de datos [58]. Por tal motivo

en el presente proyecto técnico, se utilizará a la distribución beta, como una herramienta para la obtención de los datos teóricos a analizar.

e. Distribución triangular

Una distribución triangular, provee una inicial aproximación cuando se dispone de una mínima información disponible; en esta distribución sólo se necesita conocer el valor mínimo o también denominado pesimista, el máximo o valor optimista y la moda [62]. En la Ecuación (19) se presenta la función característica de la distribución descrita:

$$f(x) = \begin{cases} \frac{2 \cdot (x - a)}{(b - a) \cdot (c - a)}, & \text{si } a \leq x \leq c \\ \frac{2 \cdot (b - x)}{(b - a) \cdot (c - a)}, & \text{si } c \leq x \leq b \end{cases} \quad (19)$$

Donde, a es el valor mínimo, c es la moda y b es el valor máximo de la función. El rango de la función de la distribución triangular es $(a \leq x \leq b)$. La media y la varianza de distribución triangular se presentan en las siguientes ecuaciones:

$$\mu = \frac{(a + b + c)}{3} \quad (20)$$

y

$$\sigma^2 = \frac{(a^2 + b^2 + c^2 - a \cdot b - a \cdot c - b \cdot c)}{18} \quad (21)$$

Donde cabe mencionar que, la función de densidad de probabilidad presenta su forma representativa, con base en el parámetro c y la ubicación con los parámetros b y a [57]. En la Figura 8 se muestra la tendencia de la función de densidad de la distribución triangular.

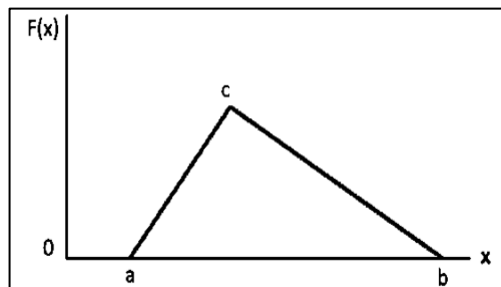


Figura 8. Grafica representativa de la función de densidad de una distribución triangular [57]

La distribución triangular se usa en situaciones en donde no se conoce la forma exacta de la distribución, pero existen estimaciones para los valores mínimos, máximos y más probables. La distribución triangular es más fácil de usar y explicar que otras distribuciones que pueden usarse en esta situación (ejemplo, la distribución beta) [58]. Además, se debe añadir que, esta distribución fue aplicada en la generación de los datos teóricos para el presente proyecto técnico.

1.22. Prueba de Kolmogorov – Smirnov

La prueba de Kolmogorov - Smirnov, (K-S, por sus siglas), es un procedimiento no parametrizado sencillo, especializado en probar si existe una oposición significativa entre una distribución de frecuencias observada y una distribución de frecuencias teórica. La prueba de K-S es, por consiguiente, otra medida de la bondad de ajuste de una distribución de frecuencia teórica [50].

Esta prueba consiste en contrastar el valor calculado de D_n con el valor crítico de D_α que se encuentra en el Anexo 1. Si D_α es mayor que D_n , entonces se valida la hipótesis nula, de lo contrario se aceptaría la hipótesis alternativa. La nomenclatura y los términos de las ecuaciones dependen de cada autor, pero, para que se entienda de una manera más fácil el valor D_n de acuerdo con [50], es así:

$$D_n = \text{máx} |F_e - F_o| \quad (22)$$

Donde F_e son las frecuencias teóricas acumuladas y F_o son las frecuencias observadas acumuladas y se escoge el mayor valor de la resta.

La Ecuación (22), se puede observar de manera más detallada en la investigación de Hou et al. [63]; dichos autores definen la prueba K-S como una prueba de ajuste sustentada en estadísticas *supremum*, que mide la diferencia vertical entre las funciones de distribución empírica, $F_n(x)$, de los datos ordenados x_i y la función de distribución acumulativa, $F(x)$, de un modelo dado. Las ecuaciones son las siguientes:

$$D = \text{máx}(D^+, D^-) \quad (23)$$

$$D^+ = \supremum \left| \frac{i}{n} - F(x) \right|; F_n(x) = \frac{i}{n}, 1 \leq i \leq n \quad (24)$$

$$D^- = \supremum \left| F(x) - \frac{(i-1)}{n} \right|; F_n(x) = \frac{(i-1)}{n}, 1 \leq i \leq n \quad (25)$$

Donde, n es el tamaño de la muestra.

Se debe mencionar y aclarar que la prueba estadística K-S tiene el objetivo de sustentar y validar los tipos de distribuciones probabilísticas que más se acercan o se ajustan a la tendencia nominal de datos que se obtienen experimentalmente, logrando obtener un mayor número de datos si estos fueran necesarios para un análisis más robusto.

1.23. Método estadístico Taguchi

El método estadístico Taguchi, es un instrumento ingenieril, capaz de simplificar y en varios casos de eliminar gran parte de las complicaciones y suposiciones que, el diseño estadístico experimental suele presentar [64]. Este método, permite definir e investigar todas las condiciones posibles en un experimento que involucra múltiples factores [65].

El objetivo principal del método estadístico Taguchi es mejorar la calidad de un producto o un proceso [66]. A continuación, se presenta en la Tabla 15, los modelos de pérdida para cada una de las características de calidad que puede presentar un proceso o un producto.

Tabla 15. Razones señal/ruido para los diferentes tipos de variables de respuesta [67]

Tipo de característica	Razón de señal/ruido
Mientras más pequeña es mejor	$-10 \cdot \log \left[\frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n Y_i^2 \right]$
Mientras más grande es mejor	$-10 \cdot \log \left[\frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \frac{1}{Y_i^2} \right]$
Su valor nominal es lo mejor (Tipo1)	$10 \cdot \log \left(\frac{\bar{Y}^2}{S^2} \right)$
Su valor nominal es lo mejor (Tipo 2)	$-10 \cdot \log(S^2)$

Proporción de defectuoso	$-10 \cdot \log \left(\frac{p}{1-p} \right)$
--------------------------	---

*Donde, n es el número de experimentos, Y es el valor de la característica de calidad (longitud, concentración, etc.), \bar{Y} es la media y S^2 es la desviación estándar

Como se muestra en la Tabla 15, los estadísticos utilizan un logaritmo debido a que reducen la posibilidad de efectos de interacción entre factores. Además, son multiplicados por una constante de 10, para trabajar en una escala maximizada obteniendo condiciones de robustez [67]. Pinar [68] menciona que, el procedimiento adecuado para implementar el método estadístico Taguchi consta de tres fases: 1) diseño del sistema, 2) diseño de parámetros y 3) diseño de tolerancia, los cuales se presentan en la Figura 9 más detalladamente.

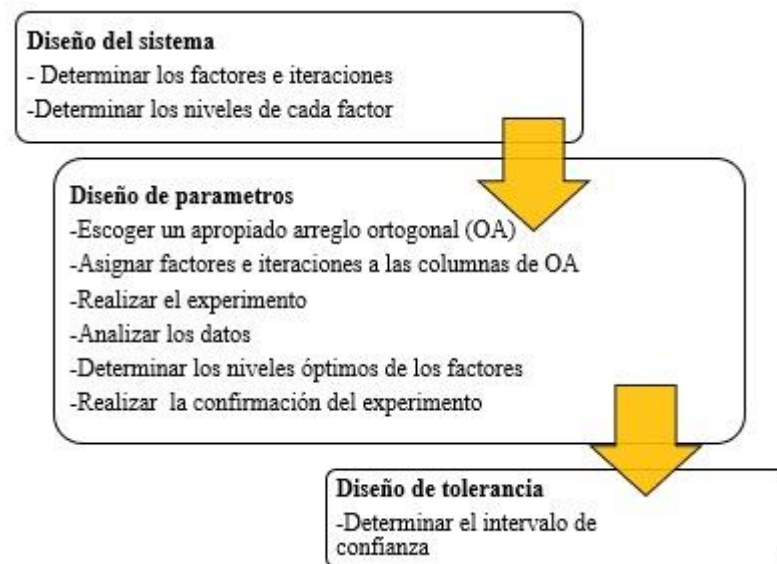


Figura 9. Pasos para aplicación de la técnica Taguchi en tres partes principales [68]

Las fortalezas de la metodología de Taguchi mencionadas por Medina et al. [66] son: 1) destacar la calidad durante la etapa del diseño del proceso, 2) reconocer la jerarquía relativa de los factores que influyen en el desempeño de los productos o procesos, 3) hacer hincapié en la disminución de la variabilidad, por medio del uso de la función de pérdida y de la razón señal - ruido y además, 4) se utiliza para el mejoramiento de procesos y productos ya existentes.

1.23.1. Arreglo ortogonal (OA)

Un arreglo ortogonal, es una matriz que permite a los ingenieros evaluar el diseño de un producto, con respecto a la robustez de la configuración de los factores de estudio, sin que estos, sufran de alguna alteración al estar presentes de señales de ruido o variables extrañas [64]. En la Ecuación (26) se muestra la designación de un arreglo ortogonal.

$$L_a(b^c) \quad (26)$$

Donde, a es el número de ensayos experimentales, b es el número de niveles de cada factor y c es el número de columnas en el arreglo.

Debido a los requerimientos del diseño experimental propuesto; es necesario seleccionar un arreglo que se ajuste correctamente a los factores y variables seleccionados. Murat [68] en su investigación, menciona una función para la selección adecuada de un arreglo ortogonal.

En la Ecuación (27) se presenta, esta misma función, denominada grados de libertad total (T_{DF} , por sus siglas en inglés).

$$T_{DF} = (n_1 - 1) \times n_f + (n_1 - 1) \times (n_1 - 1) \times n_i \quad (27)$$

Donde, n es el número de niveles de factores, n_f el número de factores y n_i es el número de interacciones.

El Dr. Taguchi, proporcionó en su método una variedad de arreglos ortogonales preestablecidos, flexibles que, se pueden adaptar a las necesidades de la experimentación y análisis a realizar [69]. En la Tabla 16 se muestran los factores y niveles permisibles para cada arreglo ortogonal.

Tabla 16. Factores y niveles para varios arreglos ortogonales [69]

Diseños ortogonales con 2 Niveles	
$L_4 (2^3)$	3 factores en 2 niveles cada uno. Consta de 4 filas.
$L_8 (2^7)$	7 factores en 2 niveles cada uno. Consta de 8 filas.
$L_{12} (2^{11})$	11 factores en 2 niveles cada uno. Consta de 12 filas.
$L_{16} (2^{15})$	15 factores en 2 niveles cada uno. Consta de 16 filas.
$L_{32} (2^{31})$	31 factores en 2 niveles cada uno. Consta de 32 filas.
$L_{64} (2^{63})$	63 factores en 2 niveles cada uno. Consta de 64 filas.
Diseños ortogonales con 3 Niveles	
$L_9 (3^4)$	4 factores en 3 niveles cada uno. Consta de 9 filas.
$L_{27} (3^{13})$	13 factores en 3 niveles cada uno. Consta de 27 filas.
$L_{27} (3^{22})$	22 factores en 3 niveles cada uno. Consta de 27 filas.
$L_{16} (4^5)$	5 factores en 4 niveles cada uno. Consta de 16 filas.
$L_{25} (5^6)$	6 factores en 5 niveles cada uno. Consta de 25 filas.

1.23.2. Criterios de selección de una matriz de Prueba

Antes de seleccionar un arreglo matricial, es necesario tomar en cuenta ciertos criterios. Cimballa [70], menciona que, para una correcta selección de un arreglo matricial, se puede seguir tres criterios: 1) Costo por experimentación, 2) tiempo de desarrollo experimental y 3) precisión requerida en los resultados. A continuación, se presenta en la Figura 10 los tipos de arreglos matriciales en función de precisión y costo.

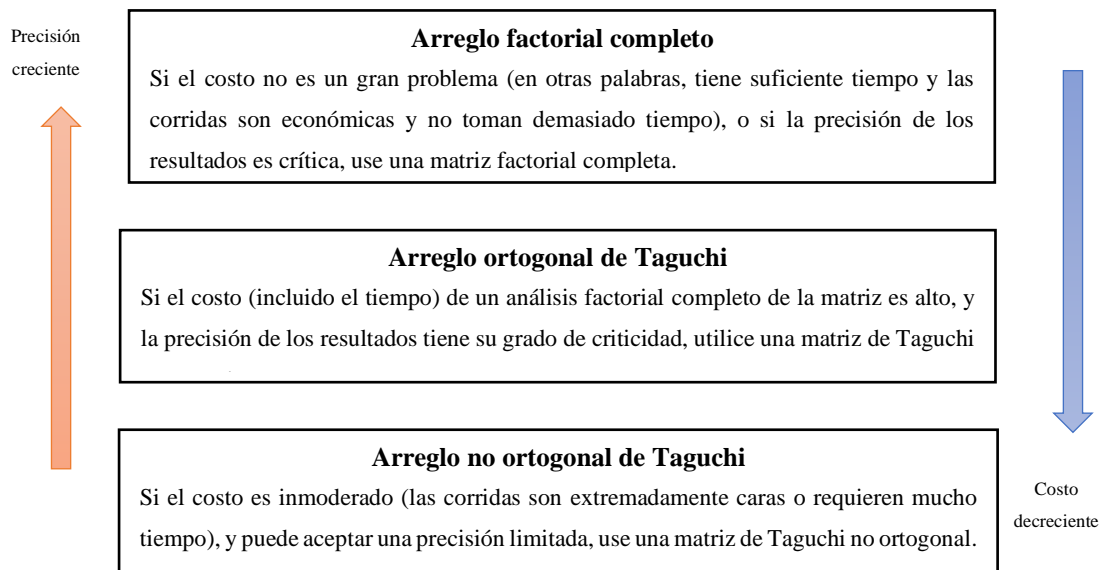


Figura 10. Ordenador jerárquico para selección de arreglos matriciales [70]

Con base en la Figura 10, los requerimientos para el desarrollo experimental del mecanizado y la consigna de obtener un mejor acabado en el fresado convexo se decide hacer el uso de un arreglo matricial ortogonal, mismo que servirá para la parametrización de los factores y niveles escogidos.

1.24. Método estadístico ANOVA

El análisis de varianza (ANOVA, por sus siglas en inglés), o también denominado análisis de variación sobre las medias, consiste en dividir la variación total presente en un conjunto de datos en "componentes ". Cada "componente" se atribuye a una causa identificable o fuente de variación; Además, un "componente" representa la variación debido a factores no controlados y errores aleatorios asociados con las mediciones de respuesta [71].

1.24.1. Términos, notaciones y desarrollo del análisis de varianza

En el método estadístico ANOVA, existe una gran cantidad variables y términos, entre los cuales se encuentran: los grados de libertad, sumas de cuadrados, cuadrados medios. etc., se calculan y organizan en un formato tabular estándar [65].

a. Número de ensayos

El número de ensayos de un diseño experimental consta de la suma del número de ensayos que se realizara en cada nivel cada nivel [65].

$$n = n_1 + n_2 + n_3 + \dots + n_L \quad (28)$$

Donde n son los ensayos realizados en el experimento.

b. Grados de libertad

Los grados de libertad (DOF, por sus silabas en inglés), son una medida de la cantidad de información, que puede determinarse de manera única a partir de un conjunto de datos entregado [65].

$$f_T = n \times r - 1 \quad (29)$$

Donde f_T son los grados de libertad totales, n es el número de ensayos y r es el número de repeticiones.

El número de grados de libertad para cada factor se obtiene con la siguiente ecuación:

$$f = \text{número de niveles} - 1 \quad (30)$$

La formulación de los grados de libertad del error se estructura de la siguiente manera, debido a que, se tiene 3 factores

$$f_e = f_T - (f_A + f_B + f_C) \quad (31)$$

c. Suma de cuadrados

La suma de los cuadrados S_T de las desviaciones de un valor objetivo o deseado Y_0 , es dada por la siguiente ecuación:

$$S_T = \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2 + n \cdot (\bar{Y} - Y_0)^2 \quad (32)$$

Donde \bar{Y} es el valor promedio de Y_i , n el número de ensayos realizados y Y_i son el conjuntos de datos (Y_1, Y_2, \dots, Y_n).

En la Ecuación (32) mostrada antes, se utiliza generalmente cuando se tiene un factor con dos niveles. En este estudio, se manejarán las fórmulas de ANOVA bidireccional, con este método se puede manejar de dos o más factores con dos o más niveles [65]. La fórmula para la suma de cuadrados queda de la siguiente manera:

$$S_T = \sum_{i=1}^n Y_i^2 - \left(\frac{1}{n}\right) \cdot \left(\sum_{i=1}^n Y_i\right)^2 \quad (33)$$

En donde, Y_i son el conjunto de datos (Y_1, Y_2, \dots, Y_n) y n el número de ensayos realizados. De la Ecuación (33) es necesario resaltar que el factor de corrección (C.F.) es:

$$C.F. = \left(\frac{1}{n}\right) \cdot \left(\sum_{i=1}^n Y_i\right)^2 \quad (34)$$

d. Varianza

La varianza mide la distribución de los datos sobre la media de los mismos, se puede definir como la suma de cuadrados dividido por los grados de libertad del experimento. Se debe calcular la varianza para cada factor [65].

$$V = \frac{S_A}{f} \quad (35)$$

Donde, S_A es la sumatoria de cuadrados para el factor A y f los grados de libertad, en este caso se tiene 3 niveles, por lo tanto, la ecuación quedaría de la siguiente forma:

$$S_A = \frac{1}{r} \left(\begin{array}{l} \text{suma de cuadrados factor } A_{\text{nivel } 1} \\ \text{suma de cuadrados factor } A_{\text{nivel } 2} \\ \text{suma de cuadrados de factor } A_{\text{nivel } 3} \end{array} + \right) - C.F. \quad (36)$$

La Ecuación (36) anterior escrita de forma matemática es:

$$S_A = \left(\frac{1}{r}\right) \cdot \left[\left(\sum_{i=1}^r Y_{i(\text{nivel } 1)}\right)^2 + \left(\sum_{i=1}^r Y_{i(\text{nivel } 2)}\right)^2 + \left(\sum_{i=1}^r Y_{i(\text{nivel } 3)}\right)^2 \right] - C.F. \quad (37)$$

Donde r es el número de repeticiones, Y_i son el conjunto de datos (Y_1, Y_2, \dots, Y_n) y (C.F.) es el factor de corrección mostrado en la Ecuación (34).

e. Suma de error de cuadrados

La suma de error de cuadrados o también conocida como (S_e), es la diferencia de los términos S_T con la sumatoria de cuadrados S_A, S_B, S_C y S_D [65]. En el presente estudio se tiene 3 factores, por lo tanto, la ecuación es:

$$S_e = S_T - (S_A + S_B + S_C) \quad (38)$$

Donde S_e es la sumatoria del error, S_T es la sumatoria de cuadrados totales mostrada en la Ecuación (33) y el cálculo de S_A hasta S_D se muestra en la Ecuación (36).

f. Razón de Varianza

La razón de varianza, expresa la relación entre el cuadrado medio del factor y el cuadrado medio del error, dando como resultado, la prueba ANOVA. Con dicho resultado y el valor del estadístico F, se valida o anula una de las dos hipótesis planteadas [60]. La ecuación es de la siguiente forma [65]:

$$F = \frac{V}{V_e} \quad (39)$$

Donde, V es la varianza de un factor y V_e es la varianza del error, este término se obtiene de la misma forma que la varianza de un factor, Cabe mencionar que el grado de libertad para el error es diferente.

g. Contribución porcentual

El porcentaje de contribución para cualquier factor se obtiene realizando la división de la suma cuadrados de un factor S para S_T y multiplicando el resultado por 100 [65]. El porcentaje de contribución se denota por P y se puede calcular usando la siguiente ecuación:

$$P = \frac{S}{S_T} \cdot 100\% \quad (40)$$

CAPÍTULO II

METODOLOGÍA

El presente capítulo se encargará de mostrar lo referente a los métodos estadísticos Taguchi y ANOVA y también se presentará una síntesis del desarrollo experimental del proyecto técnico: “Análisis de rugosidad de una superficie convexa en función de los parámetros y estrategias de mecanizado para el acero AISI 420” [1]; dando a conocer el material base de trabajo, el centro de mecanizado empleado, el instrumento de medición de rugosidad, las herramientas de corte y los datos experimentales obtenidos en el desarrollo de su investigación. Con base en esos mismos datos y haciendo uso de las distribuciones probabilísticas mostradas en el capítulo anterior, se generará nuevos datos teóricos; los cuales serán aplicados para el desarrollo del modelo predictivo propuesto en el acero M201.

2.1. Equipos e instrumentos

2.1.1. Centro de mecanizado

El centro de mecanizado utilizado en el desarrollo del proyecto técnico para la obtención de los datos experimentales [1], fue el modelo EMCO Concept Mill 260. En la Tabla 17, se muestra todas las especificaciones y características presentes en este centro de mecanizado.

Tabla 17. Especificaciones y características del centro de mecanizado empleado en la experimentación [72]

Área de trabajo	
Carrera longitudinal del eje X	350 mm
Carrera transversal del eje Y	250 mm
Carrera vertical del eje Z	300 mm
Distancia mín. nariz del cabezal – mesa	120 mm
Distancia máx. nariz del cabezal – mesa	420 mm
Dimensiones de la mesa de trabajo	
Tamaño de la mesa (L x A)	520 x 300 mm
Ranuras en T: Cantidad, anchura, distancia:	5 x 12 x 45
Carga máxima sobre la mesa	100 kg
Cabezal de fresado	
Gama de revoluciones	150 – 10000 rpm

Potencia del motor asíncrono de CA	6,8 kW
Máx. torque	34 Nm
Accionamiento	infinitamente variable
Ejes X – Y - Z	
Avance rápido en los ejes X / Y / Z	24 m/min
Avance de trabajo	0 – 10 m/min
Fuerza máxima de avance	3000 N
Variación de posicionado VDI 3441 (ejes X / Y)	0,004 mm
Variación de posicionado VDI 3441 (eje Z)	0,004 mm
Sistema de herramientas	
Número de posiciones de herramienta	20
Cono de la herramienta según DIN 69871	SK 30
Gestión del almacén	caótico
Máx. diámetro de hmta. (*sin htas. adyacentes)	63 (*80) mm
Longitud máx. de herramienta	200 mm
Peso máx. admitido de herramienta	5 kg
Tiempo de cambio de herramienta	2,5 s
Datos generales	
Potencia de conexión	9 kVA
Dimensiones de máquina (L x A x AI)	1600 x 1700 x 2200 mm
Peso	1970 kg
Aire comprimido necesario	6 bar
Controles EMCO WinNC	
SIEMENS Operate 840D sl / 828D	
SIEMENS 810D/840D	
FANUC Series 31i	
FAGOR 8055 TC	
Heidenhain TNC 426/430	

Se debe mencionar que la Universidad Politécnica Salesiana de la ciudad de Quito, sede sur, disponen de este centro de mecanizado, mismo que, se encuentra en laboratorio de control numérico computarizado.

2.1.2. Instrumentos de medición

El rugosímetro aplicado para la obtención de los datos experimental [1], fue por medio del rugosímetro Mitutoyo SJ-210. Este instrumento de medición es propiedad de la Universidad Politécnica Salesiana y se encuentra en el laboratorio de metrología de la sede sur de Quito. En la Tabla 18, se muestra detalladamente las características principales del instrumento de medición de rugosidad Mitutoyo SJ-210:

Tabla 18. Características generales del rugosímetro Mitutoyo SJ-210 [73, 74]

Características técnicas	
Rango de medición	17.5 mm
Rango detector	360 μm (-200 μm ~ +160 μm)
Velocidad de medición	0.25, 0.5, 0.75 mm/s
Fuerza de medición	0.75 mN
Longitud de corte (λ_c)	0.08, 0.25, 0.8, 2.5mm
Radio punta	2 μm
Angulo de punta	60°

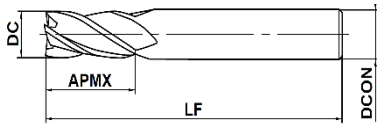
2.2. Herramientas de corte

En la actual sección se indica los tipos de herramientas de corte que se utilizaron en el mecanizado de las probetas al igual, que sus especificaciones, parámetros y condiciones de trabajo.

2.2.1. Herramienta de corte para operación de desbaste primario

Debido al requerimiento de remoción de material moderada, es idóneo utilizar una fresa integral de terminación cuadra o plana. En la Tabla 19, se muestran Las especificaciones y parámetros de la herramienta de corte (HC, por sus siglas) para desbaste.

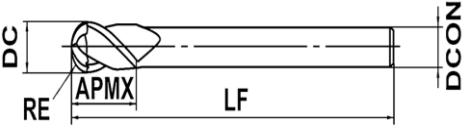
Tabla 19. Dimensiones y especificaciones de HC para desbaste [75]

Geometría		
		
Dimensiones		
DC	10	mm
APMX	25	mm
LF	70	mm
DCON	10	mm
Hélices	4	mm
Condiciones de corte		
Materiales base admisibles: Acero para herramientas, acero pre-endurecido, acero endurecido		
La rigidez de la máquina o la fijación de los materiales de trabajo son insuficientes, o si se producen ruidos o vibraciones, reduzca proporcionalmente las revoluciones y la velocidad de avance		

2.2.2. Herramienta de corte para operación de desbaste secundario

Una vez finalizado la operación de desbaste primario, es necesario hacer un cambio de herramienta de corte, para el fresado convexo. La herramienta de corte empleada fue una de punta esférica o radial [1]. En la Tabla 20, se especifica los datos técnicos de fresa de punta esférica para el desbaste secundario.

Tabla 20. Dimensiones y especificaciones de HC para desbaste secundario [75]


Geometría		
		
Dimensiones		
RE	4	mm
DC	8	mm
APMX	14	mm
LF	90	mm
DCON	8	mm
Hélices	2	mm
Materiales base admisibles: Acero endurecido (45— 55 HRC)		
La profundidad de corte es menor, se pueden aumentar las revoluciones y el avance. Para el acabado superficial es importante, reducir la velocidad de avance		

Se debe hacer hincapié que, debido a la dureza del material y el requerimiento de un buen acabado superficial, es necesario hacer uso de una herramienta de corte apta para la remoción de aceros duros.

2.2.3. Herramienta de corte para operaciones de acabado

Las (HCs) aplicadas en las operaciones de acabado, son la más críticas y relevantes en el mecanizado (CNC). Las herramientas de corte de terminación radial o esférica para acabados finos, bajo las especificaciones de alta resistencia al desgaste, una vida útil media – alta y una elevada rigidez. En la Tabla 21 se evidencia los datos técnicos más relevantes de la herramienta de corte para acabado.

Tabla 21. Dimensiones y especificaciones de HC para acabado [75]

Geometría		
		
Dimensiones		
RE	3	mm
DC	6	mm
APMX	6	mm
LF	80	mm
DCON	6	mm
Hélices	2	mm
Condiciones de corte		
Materiales base admisibles: Acero pre-endurecido (35 – 45HRC) - Acero al carbono, acero aleado (280 – 350HB) - Acero aleado (<350HB) - Acero endurecido (40 – 62HRC)		
Esta herramienta únicamente se recomienda para un mecanizado de acabado Para una buena evacuación de la viruta es muy recomendable aplicar refrigeración por soplado de aire o neblina de aceite		

2.2.4. Especificaciones del material de las (HCs)

El material constituyente de las herramientas de corte, presentado en la Sección 2.2 es el denominado metal duro. Este material, posee una alta resistencia al desgaste, una gran dureza y una dominante entereza a la compresión [76]. En la Tabla 22 se presenta una síntesis de la composición química del metal duro.

Tabla 22. Composición química y tamaño de grano del metal duro [76]

Composición base del metal duro	
Carburo de tungsteno	85 – 89 %
Cobalto	2 – 15 %
Hierro	< 1 %
Níquel	< 1 %
Tamaño de grano	0,5 a 0,8 μm

El metal duro, mientras más fino sea el grano el grano este atribuirá mejores propiedades a la resistencia y durabilidad de la herramienta, debido al tipo de mecanizado a realizar las herramientas de corte cuentan con un recubrimiento

multicapa, ideal para el mecanizado de materiales extremadamente duros de hasta 70 HRC.

2.3. Metodología de selección del arreglo ortogonal

En este experimento, los valores para la Ecuación (27) son 3, 3 y 3 respectivamente, Obteniendo como resultado de los grados de libertad del experimento 18. Aggarwal, Singh, & Kumar [77] en su investigación tiene presente que en el método Taguchi; el número de grados de libertad del arreglo ortogonal seleccionado debe ser mayor o igual al total de grados de libertad requerido para el experimento.

2.4. Factores y niveles influyentes

Según Gutiérrez & Salazar [67], mencionan que los factores son aquellas variables que se investigan en el experimento para observar cómo afectan o influyen en las variables de respuesta.

Con base en los trabajos sobre la optimización de la rugosidad superficial en el mecanizado CNC [4, 78, 3, 79] y el proyecto técnico de Dávalos y Landázuri [1]. Se muestra en la Tabla 23 los factores que se emplearon para controlar en el diseño experimental.

Tabla 23. Selección de los factores influyentes del diseño experimental

	Factores	Unidad
A	Estrategias de mecanizado	-----
B	Velocidad de corte	m/min
C	Avance por diente	mm/diente

Elaborado por: Bryan Mendoza & Victor Sánchez

Otros factores menos influyentes el mecanizado (CNC) son: los fluidos de corte, el desgaste de la herramienta, este último no incide directamente en la experimentación ya que para el desarrollo adecuado las herramientas de corte deben estar en óptimas condiciones antes de ser utilizadas [79].

2.4.1. Definición de niveles

Los niveles que se propusieron en el proyecto técnico de Dávalos y Landázuri [1] para el fresado convexo, fue a través, de las recomendaciones de maquinado para el acero AISI 420 [15, 16]. En la Tabla 24 se especificarán los niveles que se asignarán a cada uno de los factores.

Tabla 24. Selección de los niveles del diseño experimental

Factores	Niveles		
	1	2	3
Estrategias de mecanizado	zigzag	zigzag concéntrico	zigzag radial
Velocidad de corte	100	85	70
Avance por diente	0.05	0.10	0.15

Elaborado por: Bryan Mendoza & Víctor Sánchez

2.5. Presentación de los resultados experimentales

En secciones anteriores se presentaron los factores, niveles, equipos e instrumentos, además de los tres tipos de herramientas de corte utilizados en el desarrollo experimental de Dávalos y Landázuri [1].

En la Tabla 25 se indican los resultados de la rugosidad superficial de dicho estudio. Se debe señalar y hacer hincapié de que, aquellos resultados servirán como base preliminar para el desarrollo y obtención de los datos teóricos.

Tabla 25. Modelado de los Resultados experimentales [1]

ZIGZAG CONCÉNTRICO			
Vc (m/min)	fz (mm/diente)		
	0,05	0,1	0,15
100	5,144 μm	4,720 μm	5,329 μm
	5,605 μm	5,044 μm	5,682 μm
	5,451 μm	5,321 μm	5,507 μm
85	5,029 μm	5,452 μm	5,454 μm
	5,151 μm	5,518 μm	5,326 μm
	5,188 μm	5,270 μm	5,714 μm
70	5,736 μm	5,541 μm	5,833 μm

	5,689 μm 5,569 μm	5,907 μm 5,640 μm	5,924 μm 5,662 μm
ZIGZAG			
Vc (m/min)	fz (mm/diente)		
	0,05	0,1	0,15
100	2,560 μm	3,175 μm	4,068 μm
	2,173 μm	3,033 μm	3,857 μm
	2,166 μm	3,112 μm	3,332 μm
85	3,030 μm	4,431 μm	4,512 μm
	3,269 μm	4,547 μm	3,991 μm
	4,759 μm	4,823 μm	4,145 μm
70	3,659 μm	4,633 μm	4,592 μm
	3,920 μm	4,789 μm	4,601 μm
	4,150 μm	4,628 μm	4,635 μm
ZIGZAG RADIAL			
Vc (m/min)	fz (mm/diente)		
	0,05	0,1	0,15
100	2,064 μm	1,844 μm	1,825 μm
	2,032 μm	1,976 μm	1,772 μm
	2,075 μm	1,896 μm	1,771 μm
85	2,265 μm	2,117 μm	2,044 μm
	2,156 μm	2,282 μm	2,058 μm
	2,434 μm	2,271 μm	2,070 μm
70	2,327 μm	2,345 μm	2,293 μm
	2,460 μm	2,497 μm	2,325 μm
	2,219 μm	2,368 μm	2,198 μm

CAPÍTULO III

ANÁLISIS Y RESULTADOS

A continuación, se dará a conocer los resultados teóricos obtenidos a través de las distribuciones probabilísticas. Una vez obtenido los resultados, se aplicará el método Taguchi para generación del arreglo ortogonal L27. A su vez, se emplearán uno de los métodos de regresiones para el desarrollo de los modelos predictivos; con base en los mismos, se proseguirá a realizar un análisis de la varianza (ANOVA), luego de realizado ello se procederá a mostrar las conclusiones y recomendaciones del proyecto técnico.

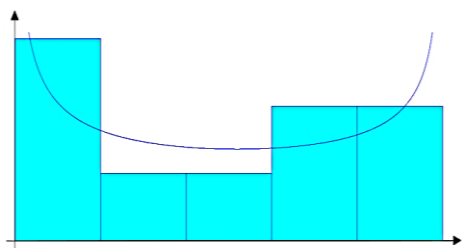
3.1. Aplicación de las distribuciones probabilísticas

En la actual sección, se darán a conocer los resultados teóricos, obtenidos a través de las distribuciones probabilísticas. De igual manera, se presentarán las funciones rigentes de cada uno de los modelos probabilísticos, con sus respectivas validaciones en la prueba estadística K-S.

Se debe mencionar que, cada una de las tablas, mantendrán una configuración estándar con respecto a las velocidades de corte, estos valores se encuentran definidos en la Tabla 24.

Los datos y resultados correspondientes que fueron empleados para el desarrollo de la Tabla 26 son los siguientes: una estrategia de mecanizado zigzag concéntrico, un avance por diente de 0,05 mm/diente, una distribución probabilística *Beta*, un error cuadrático medio de 0,011984 y un valor en la prueba estadística K-S de 0,155 valor que cumple con la condición de la prueba $K-S > 0,15$.

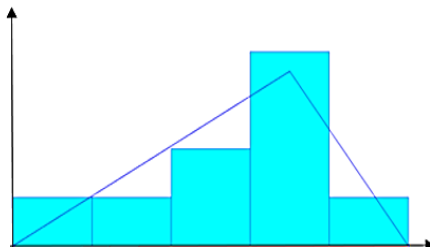
Tabla 26. Distribución Beta para el primer conjunto de datos de la trayectoria zigzag concéntrico

ZIGZAG CONCÉNTRICO _ 1				
Fz = 0,05	Vc	R_Input	Distribución Beta	R_Output
	100	5,144		5,115
		5,605		5,733
		5,451		5,446
	85	5,029		5,411
		5,151		5,735
		5,188		5,574
	70	5,736		5,101
		5,689		5,119
		5,569		5,044
Expresión Rigente = 5 + 0,81 · BETA (0,617 ; 0,646)				

Elaborado por: Bryan Mendoza & Victor Sánchez

En la Tabla 27 los datos de entrada y resultados obtenidos; se exponen a continuación: estrategia de mecanizado zigzag concéntrico, un avance por diente de 0.10 mm/diente, una distribución probabilística *Triangular*, un error cuadrático medio de 0.019552 y un valor de 0.132 en la prueba estadística K-S, valor que no cumple en totalidad con la condición de la prueba $K-S > 0.15$. Se debe señalar que, esta distribución se acepta, debido a las aperturas y consideraciones que la distribución probabilística triangular ofrece.

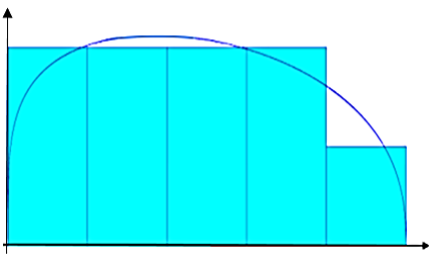
Tabla 27. Distribución Beta para el segundo conjunto de datos de la trayectoria zigzag concéntrico

ZIGZAG CONCÉNTRICO _ 2				
Fz = 0,10	Vc	R_Input	Distribución Triangular	R_Output
	100	4,72		5,061
		5,044		5,293
		5,321		5,333
	85	5,452		5,362
		5,518		5,517
		5,270		5,239
	70	5,541		4,850
		5,907		5,766
		5,640		5,209
Expresión Rigente = TRIANGULAR (4,6; 5,58 ; 6)				

Elaborado por: Bryan Mendoza & Victor Sánchez

Los datos y resultados que se utilizaron en la generación de la Tabla 28 son los siguientes: una estrategia de mecanizado zigzag concéntrico, un avance por diente de 0.15 mm/diente, una distribución probabilística *Beta*, un error cuadrático medio de 0.002036 y un valor en la prueba estadística K-S de 0.152, valor que cumple con la condición de la prueba K-S >0.15.

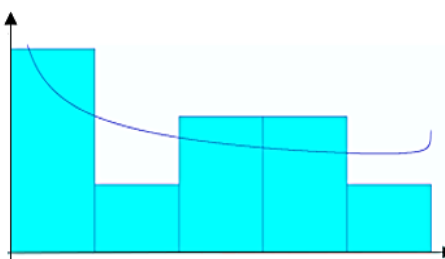
Tabla 28. Distribución Beta para el tercer conjunto de datos de la trayectoria zigzag concéntrico

ZIGZAG CONCÉNTRICO _ 3				
Fz = 0,15	Vc	R_Input	Distribución Beta	R_Output
	100	5,329		5,441
		5,682		5,782
		5,507		5,397
	85	5,454		5,537
		5,326		5,399
		5,714		5,462
	70	5,833		5,703
		5,924		5,844
		5,662		5,798
	Expresión Rigente = 5.26 + 0.73 · BETA (1.23; 1.4)			

Elaborado por: Bryan Mendoza & Victor Sánchez

Los resultados obtenidos, además de, el valor provisto en la prueba K-S que, se emplearon para generación de la Tabla 29 se encuentran a continuación: una estrategia de mecanizado zigzag, un avance por diente de 0.05 mm/diente, una distribución probabilística *Beta*, un error cuadrático medio de 0.016592 y un valor en la prueba estadística K-S de 0.122, valor que no cumple con la condición de la prueba K-S >0.15. Más se acepta debido a que, al igual que, la distribución probabilística triangular, esta distribución tiene cierta flexibilidad

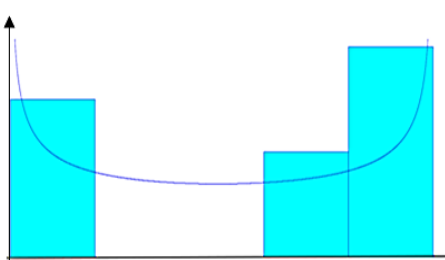
Tabla 29. Distribución Beta para el primer conjunto de datos de la trayectoria zigzag

ZIGZAG _ 1						
Fz = 0,05	Vc	R _{Input}	Distribución Beta	R _{Output}		
	100	2,56		4,135		
		2,173		3,399		
		2,166		3,428		
	85	3,03		3,829		
		3,269		3,642		
		4,759		2,980		
	70	3,659		2,424		
		3,92		2,378		
		4,15		2,821		
	Expresión Rigente = 2 + 3 · BETA (0,737; 0,965)					

Elaborado por: Bryan Mendoza & Victor Sánchez

Los factores y niveles aplicados en la estructuración de la Tabla 30 fueron los siguientes: una estrategia de mecanizado zigzag, un avance por diente de 0,10 mm/diente, una distribución probabilística *Beta*, un error cuadrático medio de 0,081609 y un valor en la prueba estadística K-S de 0,34, valor que cumple con la condición de la prueba $K-S > 0.15$.

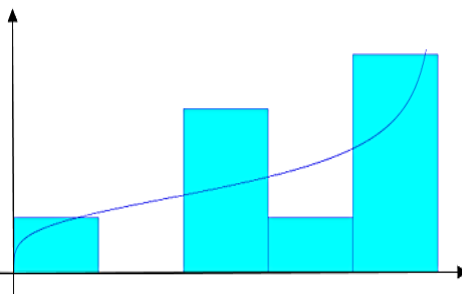
Tabla 30. Distribución Beta para el segundo conjunto de datos de la trayectoria zigzag

ZIGZAG _ 2				
Fz = 0,10	Vc	R_Input	Distribución Beta	R_Output
	100	3,175		3,297
		3,033		4,816
		3,112		4,151
	85	4,431		4,018
		4,547		4,821
		4,823		4,487
	70	4,633		3,260
		4,789		3,300
		4,628		3,082
Expresión Rigente = 3 + 2 · BETA (0,66; 0,647)				

Elaborado por: Bryan Mendoza & Victor Sánchez

Los datos y el valor de la prueba K-S aplicados en la Tabla 31 son: una estrategia de mecanizado zigzag concéntrico, un avance por diente de 0,15 mm/diente, una distribución probabilística *Beta*, un error cuadrático medio de 0,061981 y un valor en la prueba estadística K-S de 0,208, valor que cumple con la condición de la prueba $K-S > 0.15$.

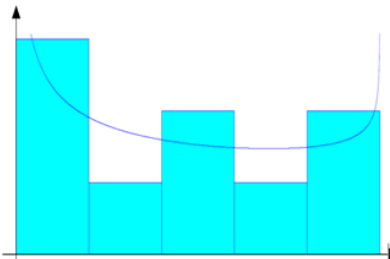
Tabla 31. Distribución Beta para el tercer conjunto de datos de la trayectoria zigzag

ZIGZAG _ 3				
Fz = 0,15	Vc	Ra_Input	Distribución Beta	Ra_Output
	100	4,068		3,857
		3,857		4,631
		3,332		4,365
	85	4,512		4,339
		3,991		3,894
		4,145		4,107
	70	4,592		4,449
		4,601		4,596
		4,635		4,613
	Expresión Rigente = 3,2 + 1,57 · BETA (1,26; 0,73)			

Elaborado por: Bryan Mendoza & Victor Sánchez

En la siguiente Tabla 32 constan los resultados de salida aplicando los siguientes criterios: una estrategia de mecanizado zigzag radial, un avance por diente de 0.05 mm/diente, una distribución probabilística *Beta*, un error cuadrático medio de 0,013429 y un valor en la prueba estadística K-S de 0,145, valor que no cumple con la condición de la prueba $K-S > 0,15$. Se acepta debido a la flexibilidad que presenta la distribución.

Tabla 32. Distribución Beta para el primer conjunto de datos de la trayectoria zigzag radial

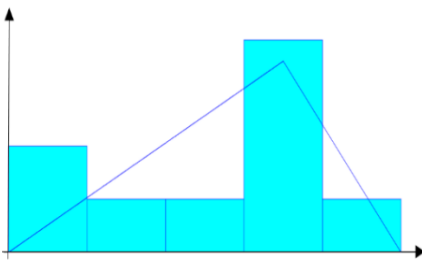
ZIGZAG RADIAL _ 1				
Fz = 0,05	Vc	Ra_Input	Distribución Beta	Ra_Output
	100	2,064		2,082
		2,032		2,452
		2,075		2,238
	85	2,265		2,250
		2,156		2,457
		2,434		2,280
	70	2,327		2,075
		2,46		2,090
		2,219		2,043
	Expresión Rigente = 2 + 0,51 · BETA (0.686; 0.863)			

Elaborado por: Bryan Mendoza & Victor Sánchez

Los datos que se manejaron en la distribución probabilística mostrados en la Tabla 33 son: una estrategia de mecanizado zigzag radial, un avance por diente de 0,10 mm/diente, una distribución probabilística *Triangular*, un error cuadrático medio de

0,070345 y un valor en la prueba estadística K-S de 0,239, valor que cumple con la condición de la prueba K-S >0,15.

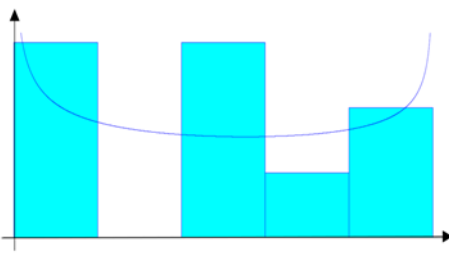
Tabla 33. Distribución Beta para el segundo conjunto de datos de la trayectoria zigzag radial

ZIGZAG RADIAL _ 2					
Fz = 0,10	Vc	Ra_Input	Distribución Triangular	Ra_Output	
	100	1,844		2,034	
		1,976		2,163	
		1,896		2,186	
	85	2,117		2,202	
		2,282		2,288	
		2,271		2,133	
	70	2,345		1,916	
		2,497		2,422	
		2,368		2,117	
	Expresión Rigente = TRIANGULAR (1.77, 2.33, 2.57)				

Elaborado por: Bryan Mendoza & Victor Sánchez

En la Tabla 34 el valor la prueba K-S y los factores aplicados son: una estrategia de mecanizado zigzag concéntrico, un avance por diente de 0,15 mm/diente, una distribución probabilística Beta, un error cuadrático medio de 0,068841 y un valor en la prueba estadística K-S de 0,193, valor que cumple con la condición de la prueba K-S >0,15.

Tabla 34. Distribución Beta para el tercer conjunto de datos de la trayectoria zigzag radial

ZIGZAG RADIAL _ 3				
Fz = 0,15	Vc	Ra_Input	Distribución Beta	Ra_Output
	100	1,825		1,861
		1,772		2,318
		1,771		2,084
	85	2,044		2,065
		2,058		2,323
		2,07		2,168
	70	2,293		1,850
		2,325		1,865
		2,198		1,791
	Expresión Rigente = 1.71 + 0.68 · BETA (0.753, 0.801)			

Elaborado por: Bryan Mendoza & Victor Sánchez

3.2. Modelación de los resultados teóricos

Después de haberse aplicado las distribuciones probabilísticas tanto beta y triangular, y someterlas a la prueba K-S, se prosigue a mostrar en la Tabla 35 los resultados teóricos, los cuales serán utilizados en la siguiente sección para aplicar el método Taguchi y generar el arreglo ortogonal L27.

Tabla 35. Datos teóricos obtenidos de las distribuciones probabilísticas

ZIGZAG CONCÉNTRICO			
V_c (m/min)	f_z (mm/diente)		
	0,05	0,1	0,15
100	5,115 μm	5,061 μm	5,441 μm
	5,733 μm	5,293 μm	5,782 μm
	5,446 μm	5,333 μm	5,397 μm
85	5,411 μm	5,362 μm	5,537 μm
	5,735 μm	5,517 μm	5,399 μm
	5,574 μm	5,239 μm	5,462 μm
70	5,101 μm	4,850 μm	5,703 μm
	5,119 μm	5,766 μm	5,844 μm
	5,044 μm	5,209 μm	5,798 μm
ZIGZAG			
V_c (m/min)	f_z (mm/diente)		
	0,05	0,1	0,15
100	4,135 μm	3,297 μm	3,857 μm
	3,399 μm	4,816 μm	4,631 μm
	3,428 μm	4,151 μm	4,365 μm
85	3,829 μm	4,018 μm	4,339 μm
	3,642 μm	4,821 μm	3,894 μm
	2,980 μm	4,487 μm	4,107 μm
70	2,424 μm	3,260 μm	4,449 μm
	2,378 μm	3,300 μm	4,596 μm
	2,821 μm	3,082 μm	4,613 μm
ZIGZAG RADIAL			
V_c (m/min)	f_z (mm/diente)		
	0,05	0,1	0,15
100	2,082 μm	2,034 μm	1,861 μm
	2,452 μm	2,163 μm	2,318 μm
	2,238 μm	2,186 μm	2,084 μm
85	2,250 μm	2,202 μm	2,065 μm
	2,457 μm	2,288 μm	2,323 μm
	2,280 μm	2,133 μm	2,168 μm
70	2,075 μm	1,916 μm	1,850 μm
	2,090 μm	2,422 μm	1,865 μm
	2,043 μm	2,117 μm	1,791 μm

Elaborado por: Bryan Mendoza & Victor Sánchez

3.3. Aplicación del método Taguchi

Cómo ya se mencionado en otras secciones el arreglo ortogonal que se va a emplear en el presente proyecto técnico es el arreglo ortogonal L27. Esto debido a que, en los grados de libertad totales, se obtuvo un valor neto de 18 y según el parámetro de condición expuesto en la Sección 2.3 el valor debe ser mayor o igual al valor obtenido. Se debe mencionar que este arreglo presenta una interacción entre factores A·B; A·C y B·C. En la Tabla 36 se muestra el arreglo a utilizar en presente proyecto técnico.

Tabla 36. Resultados teóricos obtenidos

N	Estrategias	Vc (m/min)	Fz (mm/diente)	Ra_1 (μ m)	Ra_2 (μ m)	Ra_3 (μ m)	Ra_Prom (μ m)
1	zigzag_C	100	0,05	5,115	5,733	5,446	5,431
2	zigzag_C	100	0,1	5,061	5,293	5,333	5,229
3	zigzag_C	100	0,15	5,441	5,782	5,397	5,540
4	zigzag_C	85	0,05	5,411	5,735	5,574	5,574
5	zigzag_C	85	0,1	5,362	5,517	5,239	5,373
6	zigzag_C	85	0,15	5,537	5,399	5,462	5,466
7	zigzag_C	70	0,05	5,101	5,119	5,044	5,088
8	zigzag_C	70	0,1	4,850	5,766	5,209	5,275
9	zigzag_C	70	0,15	5,703	5,844	5,798	5,782
10	zigzag	100	0,05	4,135	3,399	3,428	3,654
11	zigzag	100	0,1	3,297	4,816	4,151	4,088
12	zigzag	100	0,15	3,857	4,631	4,365	4,284
13	zigzag	85	0,05	3,829	3,642	2,980	3,484
14	zigzag	85	0,1	4,018	4,821	4,487	4,442
15	zigzag	85	0,15	4,339	3,894	4,107	4,113
16	zigzag	70	0,05	2,424	2,378	2,821	2,541
17	zigzag	70	0,1	3,260	3,300	3,082	3,214
18	zigzag	70	0,15	4,449	4,596	4,613	4,553
19	zigzag_R	100	0,05	2,082	2,452	2,238	2,257
20	zigzag_R	100	0,1	2,034	2,163	2,186	2,127
21	zigzag_R	100	0,15	1,861	2,318	2,084	2,088
22	zigzag_R	85	0,05	2,250	2,457	2,280	2,329
23	zigzag_R	85	0,1	2,202	2,288	2,133	2,208
24	zigzag_R	85	0,15	2,065	2,323	2,168	2,185
25	zigzag_R	70	0,05	2,075	2,090	2,043	2,069
26	zigzag_R	70	0,1	1,916	2,422	2,117	2,152
27	zigzag_R	70	0,15	1,850	1,865	1,791	1,835

Elaborado por: Bryan Mendoza & Victor Sánchez

3.4. Análisis comparativos

La Figura 11 presenta la gráfica rugosidad vs velocidad de corte para la estrategia Zigzag con diferentes valores de avance por diente, con base en las cifras de la Tabla 36, la siguiente grafica permite observar de forma clara la estrategia de corte que produce una menor rugosidad en el material.

En esta trayectoria el avance de 0,05 mm/diente presenta una tendencia de menor rugosidad, con una velocidad de 70 m/min la rugosidad obtenida es 2,54 μm mientras que, el mayor valor es de 4,55 μm con avance de 0,15 mm/diente y con una velocidad de 70 m/min.

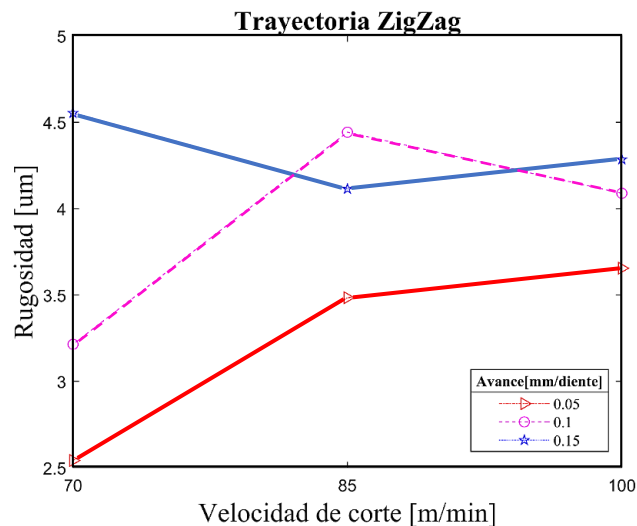


Figura 11. Rugosidad vs Velocidad de corte para la trayectoria Zigzag
Elaborado por: Bryan Mendoza & Victor Sánchez

El gráfico mostrado en la Figura 12 está realizado de acuerdo a los datos obtenidos en la Tabla 36, la comparación rugosidad vs velocidad de corte es para la estrategia Zigzag concéntrico.

En este tipo de trayectoria, el avance de 0,1 mm/diente presenta una menor rugosidad, pero, los parámetros de la rugosidad más baja de 5,088 μm son 70 m/min y 0,05 mm/diente para velocidad y avance, respectivamente, los valores de rugosidad en esta trayectoria están entre 5,0 y 5,8 μm y el avance que presenta una tendencia de rugosidad alta es de 0,15 mm/diente.

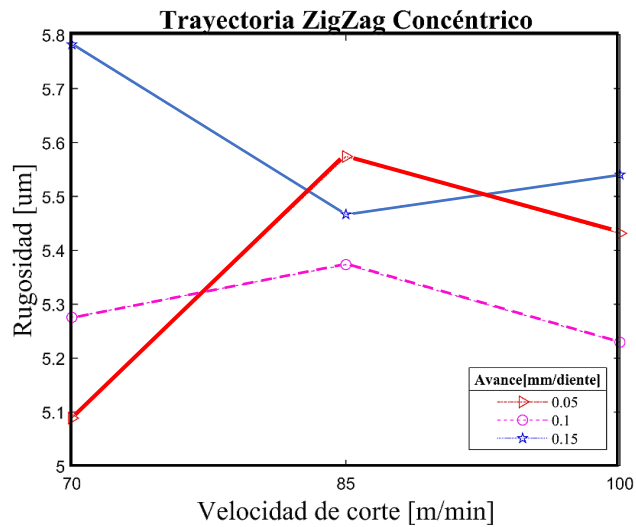


Figura 12. Rugosidad vs. Velocidad de corte para la trayectoria Zigzag Concéntrico
Elaborado por: Bryan Mendoza & Víctor Sánchez

De acuerdo a los datos de la estrategia Zigzag radial que están en la Tabla 36, se generó la gráfica de rugosidad vs velocidad de corte y se evidencia a continuación en la Figura 13

Al observar la Figura 13, claramente el avance de 0,15 mm/diente presenta la tendencia de menor rugosidad (1,83 μm) y como en las estrategias anteriores la velocidad de corte para el valor de menor rugosidad es de 70 m/min. En este caso el avance de 0,05 mm/diente presenta valores más altos de rugosidad.

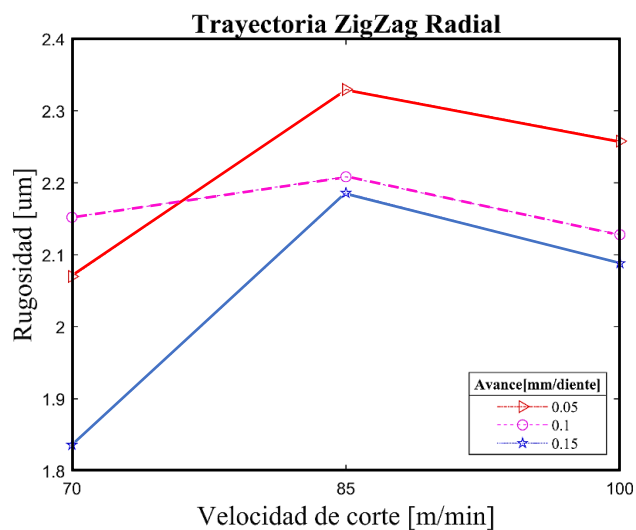


Figura 13. Rugosidad vs. Velocidad de corte para la trayectoria Zigzag Radial
Elaborado por: Bryan Mendoza & Víctor Sánchez

En la Figura 14 se tiene rugosidad, velocidad de corte y avance por diente para la trayectoria Zigzag Radial, al graficar dichas variables se forma una superficie. Esta gráfica tiene como variables independientes a la velocidad y el avance mientras que la rugosidad es la variable dependiente o la que se está investigando.

La Ecuación (41) es el resultado de realizar una regresión multilínea, al efectuar el análisis de dicha ecuación presentó un error promedio del 4,08% de sus resultados en comparación con los valores verdaderos.

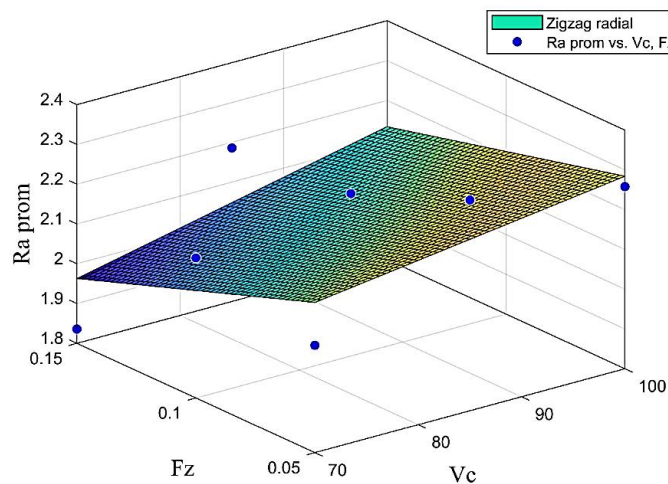


Figura 14. Rugosidad vs. Velocidad de corte y avance en 3D para la trayectoria Zigzag Radial
Elaborado por: Bryan Mendoza & Víctor Sánchez

En la siguiente ecuación, las unidades para rugosidad (R_a), velocidad de corte (V_c) y avance (F_z) son μm , m/min y mm/diente , respectivamente.

$$R_a = 2,11 + 0,00248 \cdot V_c - 3,65 \cdot F_z + 0,0214 \cdot V_c \cdot F_z \quad (41)$$

La Figura 15 evidencia una superficie para la trayectoria Zigzag concéntrico con las variables de rugosidad vs velocidad de corte y avance. La Ecuación (42) presentó un error promedio de 2,152%, siendo esta la ecuación con menor error promedio y, por lo tanto, la que tiene mayor precisión.

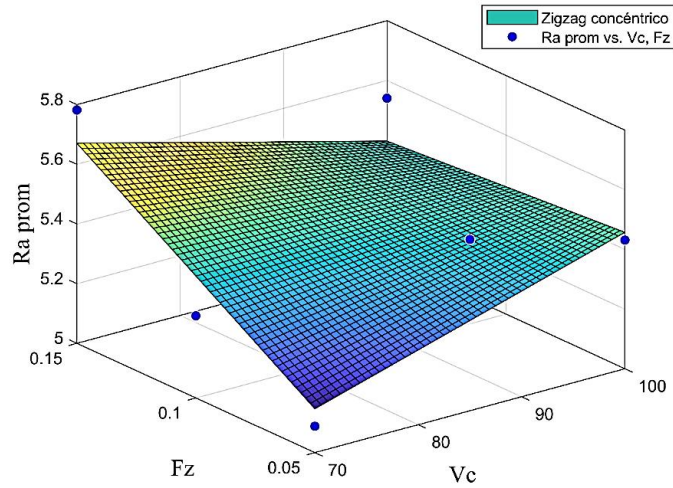


Figura 15. Rugosidad vs. Velocidad de corte y avance en 3D para la trayectoria Zigzag Concéntrico
Elaborado por: Bryan Mendoza & Víctor Sánchez

En la siguiente ecuación, las unidades para rugosidad (R_a), velocidad de corte (V_c) y avance (F_z) son μm , m/min y mm/diente , respectivamente.

$$R_a = 3,48 + 0,0201 \cdot V_c + 18,9 \cdot F_z - 0,195 \cdot V_c \cdot F_z \quad (42)$$

La gráfica de rugosidad vs velocidad de corte y avance para la estrategia Zigzag se muestra a continuación en la Figura 16. En esta estrategia la Ecuación (43) presentó un error promedio de 5,631% y el más alto en comparación con la otras.

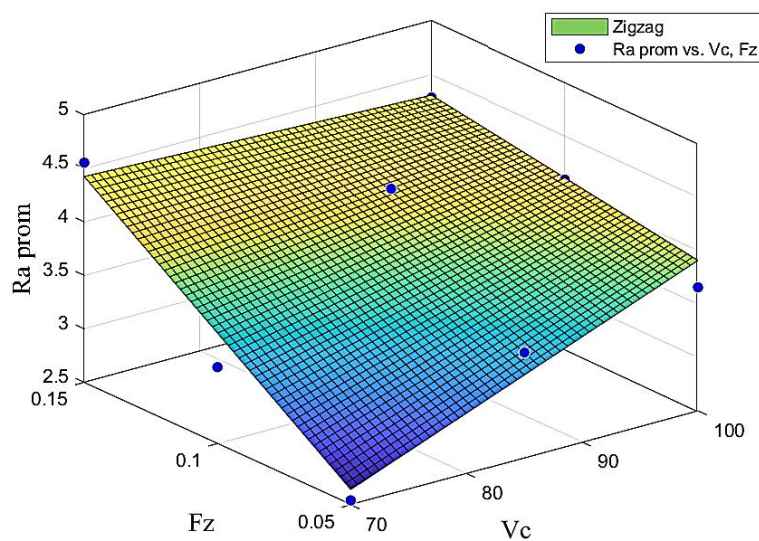


Figura 16. Rugosidad vs. Velocidad de corte y avance en 3D para la trayectoria Zigzag
Elaborado por: Bryan Mendoza & Víctor Sánchez

En la siguiente ecuación, las unidades para rugosidad (R_a), velocidad de corte (V_c) y avance (F_z) son μm , m/min y mm/diente , respectivamente.

$$R_a = -2,81 + 0,0651 \cdot V_c + 50,0 \cdot F_z - 0,460 \cdot V_c \cdot F_z \quad (43)$$

En la Figura 17 los valores de predicción obtenidos mediante el modelo matemático para la estrategia zigzag radial se asemejan a los valores verdaderos, en la Tabla 37 se muestra de manera más detallada el porcentaje de variación de cada uno de estos valores.

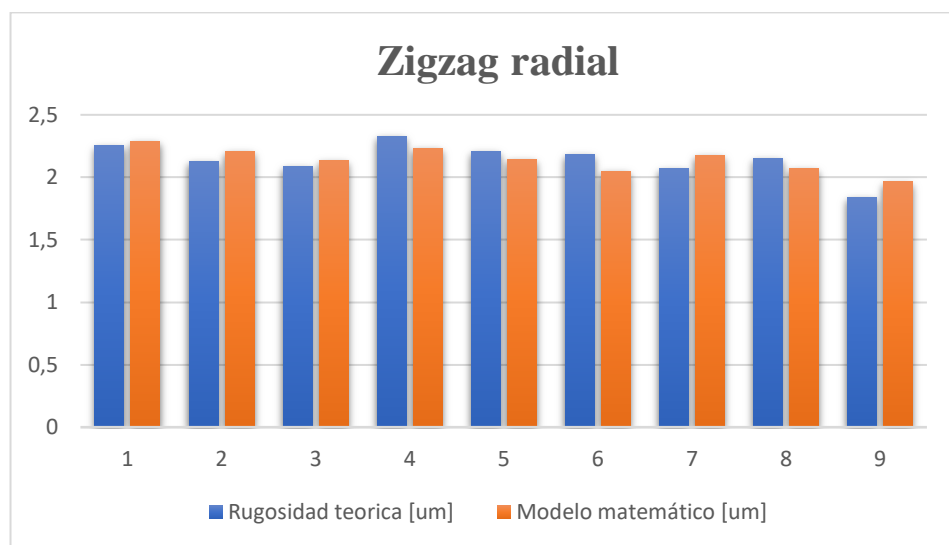


Figura 17. Diagrama de barras entre los datos de rugosidad teórica y los del modelo matemático para la estrategia zigzag radial

Elaborado por: Bryan Mendoza & Victor Sánchez

En la Tabla 37 se relaciona el porcentaje de error entre las cifras de rugosidad teórica obtenidas de la Tabla 36 y los valores del modelo matemático, estos valores fueron obtenidos reemplazando los datos de velocidad de corte y avance en la Ecuación (41).

Tabla 37. Porcentaje de error entre las cifras de rugosidad teórica y las obtenidas por el modelo matemático para la estrategia zigzag radial

Rugosidad teórica [μm]	Modelo matemático [μm]	Error [%]
2,257	2,284	1,160
2,127	2,208	3,802
2,088	2,133	2,182
2,329	2,230	4,245
2,208	2,139	3,116
2,185	2,048	6,296
2,069	2,177	5,199
2,152	2,070	3,807
1,835	1,962	6,917
Error promedio		4,080

Elaborado por: Bryan Mendoza & Victor Sánchez

En la siguiente Figura 18 y al igual que las demás la variación que se observa es pequeña, esto algo muy deseable en cualquier modelo matemático debido a que la ecuación que se obtuvo presenta una predicción de valores acertada.

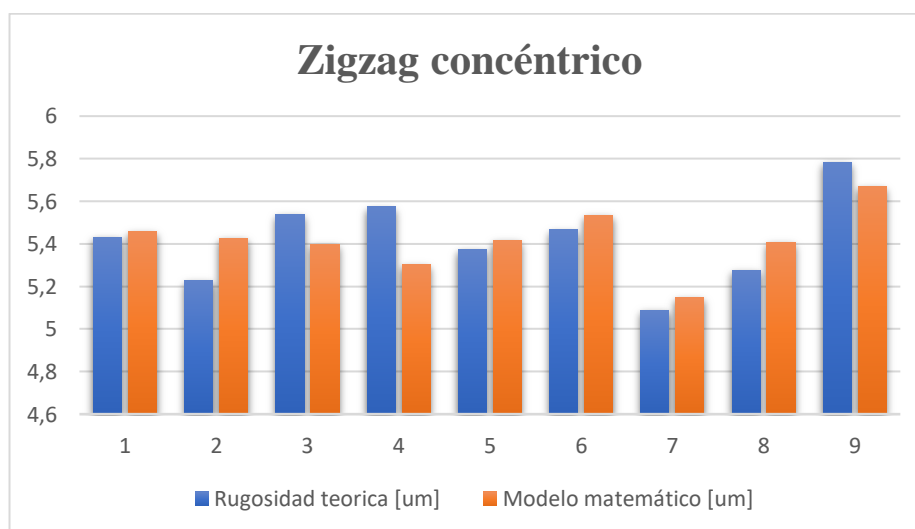


Figura 18. Diagrama de barras entre los datos de rugosidad teórica y los del modelo matemático para la estrategia zigzag concéntrico

Elaborado por: Bryan Mendoza & Victor Sánchez

Las tablas que se presentan permiten analizar de mejor manera cual modelo matemático presenta una menor variación en sus datos, siendo un complemento a los diagramas de barras para dar una idea más clara de los resultados. Como se observa en

la Tabla 38, el error promedio para el modelo matemático de la estrategia zigzag concéntrico, es el más bajo, por lo tanto, la Ecuación (42) es la más exacta.

Tabla 38. Porcentaje de error entre las cifras de rugosidad teórica y las obtenidas por el modelo matemático para la estrategia zigzag concéntrico

Rugosidad teórica [μm]	Modelo matemático [μm]	Error [%]
5,431	5,457	0,4777
5,229	5,427	3,782
5,540	5,396	2,590
5,574	5,302	4,878
5,373	5,417	0,8276
5,466	5,533	1,226
5,088	5,146	1,144
5,275	5,408	2,525
5,782	5,670	1,924
Error promedio		2,152

Elaborado por: Bryan Mendoza & Victor Sánchez

En la siguiente Figura 19 los datos del modelo matemático para la trayectoria zigzag presentan en su mayoría una cercanía a los valores verdaderos, dando a conocer a simple vista que la Ecuación (43) presentada es correcta.

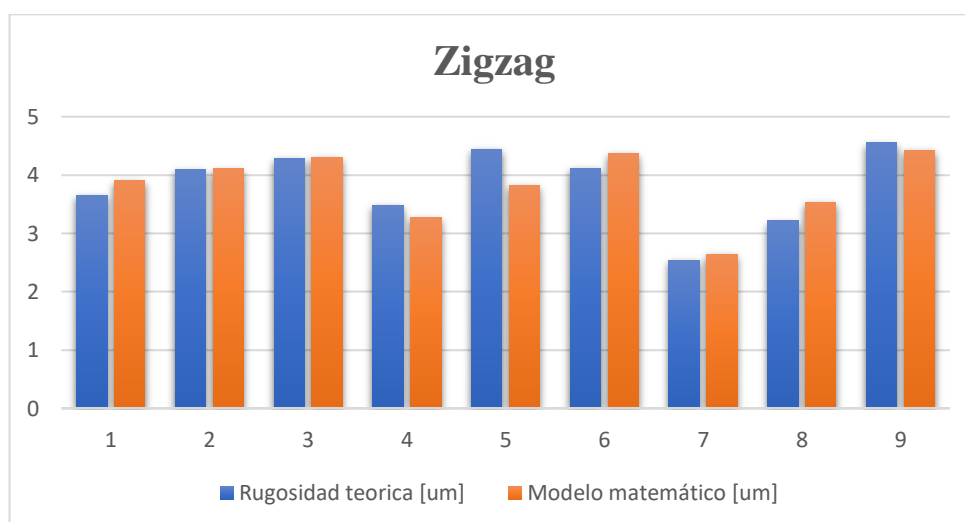


Figura 19. Diagrama de barras entre los datos de rugosidad teórica y los del modelo matemático para la estrategia zigzag

Elaborado por: Bryan Mendoza & Victor Sánchez

Con los datos de la Tabla 39 se analiza que la Ecuación (43) presenta un mayor error promedio a comparación de las mostradas anteriormente. Es importante destacar que los errores promedios obtenidos en las 3 ecuaciones fueron menores de 6%, indicando su validez, debido a que, se encuentran por debajo del 15% [80].

Tabla 39. Porcentaje de error entre las cifras de rugosidad teórica y las obtenidas por el modelo matemático para la estrategia zigzag

Rugosidad teórica [μm]	Modelo matemático [μm]	Error [%]
3,6548	3,906	6,883
4,088	4,106	0,4326
4,284	4,306	0,4961
3,484	3,274	6,014
4,442	3,819	14,01
4,113	4,364	6,103
2,541	2,642	3,972
3,214	3,533	9,920
4,553	4,423	2,840
Error promedio		5,631

Elaborado por: Bryan Mendoza & Victor Sánchez

La Ecuación (44) utilizada para obtener el error relativo de acuerdo con [81], es la siguiente

$$E\% = \left| \frac{real - simulado}{real} \right| \cdot 100\% \quad (44)$$

Donde el valor real son los datos de rugosidad teórica y el valor simulado son los datos del modelo matemático.

3.5. Desarrollo del método estadístico ANOVA

Para entender como es el procedimiento de este método estadístico, se mostrarán los cálculos para el factor velocidad de corte utilizando las fórmulas mostradas en el capítulo 2, necesarias para encontrar el valor de F, este valor permite realizar la prueba de hipótesis. Los ejemplos de cálculo se muestran a continuación:

3.5.1. Grados de libertad

a. Grados de libertad totales

Se utiliza la Ecuación (29) para determinar este valor.

$$f_T = 9 \times 3 - 1$$
$$f_T = 26$$

b. Grados de libertad para factores

Mediante la Ecuación (30), los grados de libertad en el factor velocidad de corte y los demás 2 factores es:

$$f_A = 3 - 1$$
$$f_A = 2$$

c. Grados de libertad para el error

Con la Ecuación (31) quedaría de la siguiente manera:

$$f_e = 26 - (2 + 2 + 2)$$
$$f_e = 20$$

3.5.2. Suma de cuadrados totales

Con el objetivo de determinar el valor de la suma de cuadrados totales se emplea la Ecuación (33).

$$S_T = (5,431^2 + 5,229^2 + 5,540^2 + \dots + 1,835^2)$$
$$- \frac{1}{27} (5,431 + 5,229 + 5,540 + \dots + 1,835)^2$$
$$S_T = 440,6 - 388,3$$
$$S_T = 52,31$$

3.5.3. Varianza

Para determinar la varianza mostrada en la Ecuación (35) se debe primero calcular la sumatoria de cuadrados para el factor y esto se lo realiza con la Ecuación (37). Para el factor de velocidad de corte se realiza la suma de cuadrados para cada nivel.

Nivel 1 (100 m/min):

$$S_{A(nivel\ 1)} = \frac{1}{9}(3,654 + 4,088 + \dots + 2,088)^2$$

$$S_{A(nivel\ 1)} = 133,8$$

Nivel 2 (85 m/min):

$$S_{A(nivel\ 2)} = \frac{1}{9}(3,484 + 4,442 + \dots + 2,185)^2$$

$$S_{A(nivel\ 2)} = 137,5$$

Nivel 3 (70 m/min):

$$S_{A(nivel\ 3)} = \frac{1}{9}(2,541 + 3,214 + \dots + 1,835)^2$$

$$S_{A(nivel\ 3)} = 117,4$$

$$S_A = 133,8 + 137,5 + 117,4 - 388,3$$

$$S_A = 0,4490$$

$$V_A = \frac{0,4490}{2}$$

$$V_A = 0,2245$$

3.5.4. Suma de error de cuadrados

Después determinar la sumatoria de cuadrados para los 3 factores de este proyecto técnico, se procede a determinar la sumatoria de error de cuadrados con la Ecuación (38).

$$S_e = 52,31 - (0,4490 + 48,37 + 0,6492)$$

$$S_e = 2,839$$

3.5.5. Razón de varianza

Primero se debe determinar la varianza del error y se calcula de la misma manera que los factores, es decir, la suma de cuadrados dividido para los grados de libertad.

$$V_e = \frac{2,839}{20}$$

$$V_e = 0,1419$$

Entonces, la razón de varianza para el factor A utilizando la Ecuación (39) es:

$$F_A = \frac{0,2245}{0,1419}$$

$$F_A = 1,581$$

3.5.6. Contribución porcentual

Utilizando la Ecuación (40) la contribución porcentual para el factor A es:

$$P = \frac{0,4490}{52,31} \cdot 100\%$$

$$P = 0,8584 \%$$

Los resultados de las fórmulas mostradas anteriormente para los factores velocidad de corte, avance por diente y trayectoria, se hallan en la Tabla 40.

Tabla 40. Resultados del análisis de ANOVA

	Factores	DF	S	V	F	%P
(A)	Velocidad de corte [m/min]	2	0,449	0,2245	1,581	0,8584
(B)	Avance por diente [mm/diente]	2	0,6492	0,3246	2,286	1,241
(C)	Estrategia	2	48,37	24,18	170,3	92,47
--	Error	20	2,839	0,1419	-	5,427
(S _t)	Total	26	52,31	-	-	100

Elaborado por: Bryan Mendoza & Victor Sánchez

3.6. Prueba de hipótesis

El estadístico F orienta a aceptar o no la influencia de la velocidad de corte, el avance y las estrategias en la rugosidad, las hipótesis que se manejan son la nula o la alternativa que se formulan en breve. Encontrar el valor F crítico es necesario para saber que hipótesis se aceptará, más adelante se muestra cómo obtener este valor.

3.6.1. Hipótesis nula

La hipótesis es: “Todas las medias son iguales”.

$$H_0 = \mu_1 = \mu_2 = \mu_3 \quad (45)$$

Cuando se acepta la Ecuación (45) significa que el factor que se hizo la prueba no influye en la rugosidad. Se acepta cuando la razón de varianza del factor es menor que el F crítico.

3.6.2. Hipótesis alternativa

Rechazar H_0 significa la aceptación de una hipótesis alternativa H_1 .

$$H_1 = \text{Al menos una de las medias no es igual} \quad (46)$$

Cuando se acepta la Ecuación (46) significa que el factor que se hizo la prueba si influye en la rugosidad. Se acepta cuando la razón de varianza del factor es mayor que el F crítico.

3.7. Análisis de resultados

En la validación de los resultados obtenidos, se utiliza la tabla de distribución F con 95% de confianza, las cantidades de esta distribución se evidencian en la Tabla 41. Para saber cuál es nuestro valor de F crítico (f_α), es necesario conocer el número de grados de libertad del numerador (V_1) y del denominador (V_2). Dichos datos fueron calculados anteriormente, véase la Sección 3.5.1.

V_1 = grados de libertad para cada factor = 2

V_2 = grados de libertad para el error = 20

Tabla 41. Distribución F con 95% de confiabilidad o con 0,05 de nivel de significancia [82]

V2	V1		
	1	2	3
1	161,45	199,5	215,71
2	18,51	19	19,16
3	10,13	9,55	9,28
4	7,71	6,94	6,59
5	6,61	5,79	5,41
6	5,99	5,14	4,76
7	5,59	4,74	4,35
8	5,32	4,46	4,07
9	5,12	4,26	3,86
10	4,96	4,1	3,71
11	4,84	3,98	3,59
12	4,75	3,89	3,49
13	4,67	3,81	3,41
14	4,6	3,74	3,34
15	4,54	3,68	3,29
16	4,49	3,63	3,24
17	4,45	3,59	3,2
18	4,41	3,55	3,16
19	4,38	3,52	3,13
20	4,35	3,49	3,1

Mediante el uso de la Tabla 41 se obtiene el valor de la prueba F, el cual, para el presente análisis es 3,49.

La Figura 20 muestra en que zona se encuentran los factores analizados en la distribución F, estos factores pueden estar en la zona de aceptación o en la zona de rechazo, el f_α es el valor del F crítico obtenido de la tabla anterior.

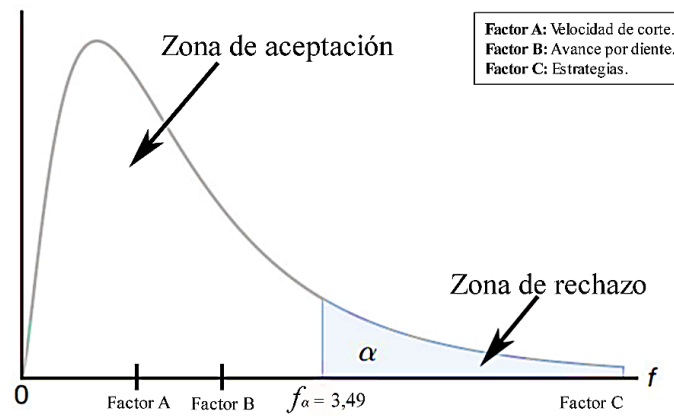


Figura 20. Análisis del estadístico F para los 3 factores
Elaborado por: Bryan Mendoza & Victor Sánchez

De la figura anterior se puede extraer los siguientes análisis:

La velocidad de corte, factor A, tiene un valor de razón de varianza de 1,581 el cual es menor que 3,49. Es decir, se acepta la hipótesis nula y por consiguiente se concluye que la velocidad de corte no influye significativamente en la rugosidad. El avance por diente, factor B, tiene un valor de razón de varianza de 2,286 el cual es menor que 3,49, es decir, se acepta la hipótesis nula y por consiguiente se deduce que el avance por diente no influye significativamente en la rugosidad. En el caso de las estrategias, factor C, su valor para la razón de varianza es de 170, 4, dicho valor es mayor que 3,49, en este caso se rechaza la hipótesis nula, esto significa que se acepta la hipótesis alternativa, lo que significa que las estrategias si influyen en la rugosidad.

Luego de realizado la prueba de hipótesis se procede a determinar el factor más influyente en la rugosidad, desde el más influyente hacia el menos influyente, esto se lo puede observar en la Tabla 42, estos datos fueron obtenidos al realizar el análisis de las medias de Taguchi mediante un software estadístico.

Tabla 42. Análisis de las medias mediante el método de Taguchi

Nivel	Estrategias	Velocidad de corte (Vc)	Avance por diente (Fz)
1	3,82	3,613	3,604
2	5,418	3,909	3,79
3	2,14	3,856	3,983
Delta	3,278	0,296	0,38
Clasificar	1	3	2

Elaborado por: Bryan Mendoza & Victor Sánchez

Al observar la tabla anterior se concluye que el factor más influyente en la rugosidad son las estrategias de mecanizado seguido del avance por diente y finalmente en último lugar de influencia esta la velocidad de corte.

3.8. Predicción de rugosidad superficial óptima

Las cantidades que están de color rojo de la Tabla 42, son los datos con menor rugosidad promedio de cada factor, y con la Figura 21 permiten predecir con que parámetros la rugosidad será menor. Para las estrategias el nivel 3, para la velocidad de corte es el nivel 1 y para el avance por diente es de igual forma el nivel 1.

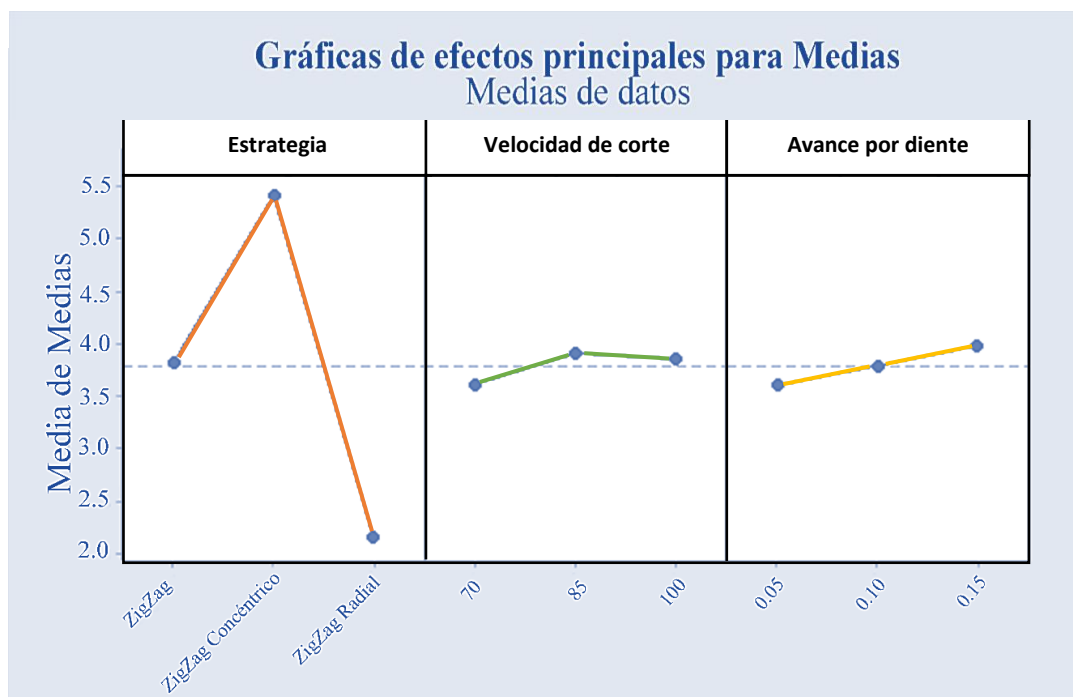


Figura 21. Gráfica de las Medias del análisis de Taguchi
Elaborado por: Bryan Mendoza & Victor Sánchez

Al observar la gráfica anterior y luego de identificado los niveles, los parámetros para una rugosidad óptima se evidencian en la siguiente tabla:

Tabla 43. Parámetros para una rugosidad óptima en el acero M201

Combinación óptima de rugosidad	
Estrategia	Zigzag Radial
Velocidad de corte [m/min]	70
Avance por diente [mm/diente]	0,05

Elaborado por: Bryan Mendoza & Victor Sánchez

De acuerdo con [65], para determinar el resultado estimado en condiciones óptimas o en este caso la rugosidad óptima se utiliza la ecuación siguiente:

$$R_{opt} = R_{prom} + (X - R_{prom}) + (Y - R_{prom}) + (Z - R_{prom}) \quad (47)$$

Reduciendo la ecuación anterior quedaría de la siguiente forma:

$$R_{opt} = X + Y + Z - 2 \cdot R_{prom} \quad (48)$$

Donde X, Y, Z son los valores menores de las medias de la Tabla 42 de: estrategias, velocidad de corte y avance por diente, respectivamente. R_{prom} es el valor promedio de todas las medias.

$$X = 2,140 \mu m$$

$$Y = 3,613 \mu m$$

$$Z = 3,604 \mu m$$

El valor promedio de los datos de las medias de la Tabla 42, es:

$$R_{prom} = \frac{3,82 + 5,41 + 2,14 + 3,613 + 3,909 + 3,856 + 3,604 + 3,79 + 3,983}{9}$$

$$R_{prom} = 3,792 \mu m$$

El valor para la rugosidad optima utilizando la Ecuación (48) es:

$$R_{opt} = 2,140 + 3,613 + 3,604 - 2 \cdot 3,792$$

$$R_{opt} = 1,772 \mu m$$

Según [65], el intervalo de confianza para las estimaciones se calcula con la ecuación siguiente:

$$C.I. = \sqrt{f(1, V_2) \cdot V_e \cdot \left(\frac{1}{N_{eff}} + \frac{1}{R_p} \right)} \quad (49)$$

Donde $f(1, V_2)$ es el valor del estadístico F de la Tabla 41, V_2 son los grados de libertad del error, V_e es la varianza del error, R_p es el número de veces que se midió la rugosidad y N_e es el número efectivo de replicaciones y se calcula con la siguiente ecuación:

$$N_{eff} = \frac{n}{1 + f_i} \quad (50)$$

Donde n es el número total de pruebas realizadas y f_i es el número total de grados de libertad de los factores más influyentes.

Para obtener el intervalo de confianza primero es necesario calcular el número efectivo de replicaciones con la Ecuación (50) y sabiendo que el número total de pruebas realizadas es 27 y al realizar la prueba de hipótesis dio como resultado que solo el factor estrategias es el más influyente, el f_i es 2, en el caso de que hubiese existido dos factores influyentes el f_i sería la suma de sus grados de libertad dando como resultado cuatro.

$$N_{eff} = \frac{27}{1 + 2}$$

$$N_{eff} = 9$$

Al ingresar a la Tabla 41 con V_1 igual a 1 y V_2 igual a 20 el estadístico F es 4,35, el V_e es 0,1419 mostrado en la Tabla 40 y R_p es 3 como se observa en la Tabla 25 entonces, el intervalo de confianza utilizando la Ecuación (49) es:

$$C.I. = \sqrt{4,35 \cdot 0,1419 \cdot \left(\frac{1}{9} + \frac{1}{3} \right)}$$

$$C.I. = \pm 0,5238$$

Por lo tanto, mediante la aplicación de los métodos estadísticos Taguchi y ANOVA se presenta la rugosidad superficial óptima teórica para el fresado convexo en el acero M201, siendo el valor obtenido de $1,772 \mu m$ con un intervalo de tolerancia de $\pm 0,5238 \mu m$.

CONCLUSIONES

- Las variables o factores que tienen influencia en el acabado superficial del acero M201 son la velocidad de corte, avance, paso, estrategia de mecanizado, fluidos de corte, desgaste de la herramienta y tratamientos termoquímicos. Los factores que afectan en mayor medida y los incluidos en el presente estudio fueron: velocidad de corte, avance y estrategias de mecanizado.
- De acuerdo con las cifras obtenidas en la Tabla 40 mediante el análisis de Taguchi y ANOVA, las variables que afectan a la rugosidad y al acabado superficial del acero M201 y sus porcentajes de influencia son: estrategia de mecanizado con 92,47%, velocidad de corte con 0,8584% y avance por diente con 1,241%.
- En las comparaciones de las medias a partir de los datos generados por medio de distribuciones estadísticas, los factores y niveles apropiados para el acero M201 para un mejor acabado superficial y por consiguiente una menor rugosidad son: zigzag radial como estrategia de mecanizado, una velocidad de corte de 70 m/min y un avance de 0,05 mm/diente, obsérvese la Tabla 43. Las herramientas recomendadas y sus especificaciones, para el mecanizado de dicho acero, ya sea, para operaciones de desbaste o acabado se muestran en la Sección 2.2.
- Al realizar análisis de Taguchi de las variaciones de rugosidad y después de haber realizado la prueba de hipótesis de ANOVA, el valor de rugosidad óptima teórica que se puede obtener con los parámetros adecuados en estrategias de mecanizado, velocidad de corte y avance por diente mencionados en el párrafo anterior es 1,772 con una tolerancia de $\pm 0,5238 \mu\text{m}$.
- Los modelos matemáticos generados a partir de las regresiones multilineales y de métodos estadísticos en las estrategias zigzag radial, zigzag concéntrico y zigzag presentaron errores promedios de 4,08%, 2,152% y 5,631%. Estos errores están por debajo del 15% indicando que los modelos matemáticos son correctos y predicen la rugosidad con una buena exactitud, véase la Sección 3.4.

RECOMENDACIONES

- En la presente recomendación, se sugiere corroborar y validar los datos generados en una futura investigación experimental de manera que se analicen las variaciones o desfases entre los resultados teóricos y experimentales, además de encontrar el error porcentual y la desviación estándar correspondiente entre el modelado predictivo y los resultados reales del maquinado.
- Con base en las ecuaciones predictivas, establecidas en el Capítulo III, se recomienda proveer de un factor de corrección el cual permita adecuar a las funciones ya existentes, a un margen mínimo de error del 2 % proveyendo de esta manera un modelo totalmente funcional y aplicable.
- Si se desea obtener datos totalmente fiables con una alta exactitud en desarrollo experimental, se sugiere que, en próximas investigaciones se utilice instrumentos de medición de rugosidad con una alta apreciación y una elevada resolución, además que el instrumento se encuentra con su respectiva certificación ISO 17025 de calibración de instrumentos metrológicos.
- No se recomienda en lo absoluto variar o modificar las estrategias de mecanizado, debido a que, si esto ocurriese el modelo y la parametrización ofrecida en este trabajo quedaría inutilizada y desechada, por negligencia de los investigadores que intenten validar dicho modelo.

REFERENCIAS

- [1] E. J. Dávalos Álvarez y D. S. Landázuri Zaldumbide, Análisis de rugosidad de una superficie convexa en función de los parámetros y estrategias de mecanizado para el acero AISI 420, Quito, 2020 - 06 -25.
- [2] C. E. Mora Contreras, «La calidad del servicio y la satisfacción del consumidor,» *Revista Brasileira de Marketing*, vol. 10, nº 2, pp. 146-162, 2011.
- [3] G. Krishna Doneti , N. Sandeep, O. Kalyani, P. Revanth, R. Kumar Aravind y S. Rai Kumar , «Taguchi Analysis on Cutting Forces in Milling OHNS with Carbide Insert,» *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)* , vol. 5, nº 4, pp. 2312-2317, 2018.
- [4] V. Parashar , S. S. Bhadauria y Y. Sahu, «Optimization of surface roughness using Taguchi method in end milling of steel grade EN19 with tin coated carbide tool,» *International Journal of Mechanical And Production Engineering*, vol. 3, nº 2, pp. 58-61, 2015.
- [5] L. M. Maiyar, R. Ramanujam, K. Venkatesan y J. Jeraldd, «Optimization of Machining Parameters for End Milling of Inconel 718 Super Alloy Using Taguchi Based Grey Relational Analysis,» *Procedia Engineering*, vol. 64, p. 1276 – 1282, 2013.
- [6] Pro Ecuador, «proecuador.gob.ec,» [En línea]. Available: <https://www.proecuador.gob.ec/metalmecanica-y-automotriz/>. [Último acceso: 07 11 2019].
- [7] Fedimetal, «fedimental.com.ec,» 2019, 08. [En línea]. Available: <http://fedimetal.com.ec/wp-content/uploads/2019/08/Fedimetal.pdf>. [Último acceso: 07 11 2019].
- [8] Alacero, «alacero.org,» 04 11 2019. [En línea]. Available: <https://www.alacero.org/es/page/prensa/noticias/menor-produccion-de-acero-bruto-en-33-meses-preocupa-al-mercado-latinoamericano>. [Último acceso: 08 11 2019].
- [9] P. Pérez, «Universidad Politecnica Salesiana del Ecuador,» 21 Diciembre 2016. [En línea]. Available: <https://www.ups.edu.ec/noticias?articleId=8186684>. [Último acceso: 10 Enero 2020].

- [10] Acefer, «acefer.com.co,» [En línea]. Available: <https://acefer.com.co/>. [Último acceso: 24 11 2019].
- [11] Sumindu, «sumindu.com,» [En línea]. Available: <http://www.sumindu.com/especificaciones/6-%20P20.pdf>. [Último acceso: 24 11 2019].
- [12] BÖHLER Bleche GmbH & CO KG., M201 KUNSTSTOFFFORMENSTAHL, 2015.
- [13] SISA, «sisal.com,» 2012. [En línea]. Available: <http://sisal.com.mx/pdf/Acero%20SISA%20P20.pdf>. [Último acceso: 24 11 2019].
- [14] Aceros Bohler, «Bohler,» 2020. [En línea]. Available: <https://www.acerosbohler.com/es/products/m303/>. [Último acceso: 17 06 2020].
- [15] Catálogo Bohler Acero M303, «Aceros Bohler,» 2019. [En línea]. Available: [acerosbohler.com/app/uploads/sites/101/2019/08/M303En.pdf](https://www.acerosbohler.com/app/uploads/sites/101/2019/08/M303En.pdf). [Último acceso: 17 06 2020].
- [16] Bohler, «medindustrie,» [En línea]. Available: https://www.medindustrie.com/imgsite/pdf/medindustrie_1494407559.pdf. [Último acceso: 17 06 2020].
- [17] Aceros SISA, «Elementos en la aleación de los aceros y sus efectos,» 2013. [En línea]. Available: <http://sisal.com.mx/pdf/Aceros%20SISA%20Elementos%20en%20la%20Aleacion%20de%20los%20Aceros%20Especiales.pdf>. [Último acceso: 09 01 2020].
- [18] S. R. S. Serope Kalpakjian, Manufactura, ingeniería y tecnología, México: Pearson Educación, 2008.
- [19] M. P. Groover, Fundamentos de manufactura moderna, Tercera edición, México: McGraw-Hill/Interamericana, 2007.
- [20] M. P. Groover, Fundamentals of modern manufacturing: materials, processes and systems, 4th ed., JOHN WILEY & SONS, INC., 2010.
- [21] ASM International, Metals Handbook, Vol. 16: Machining, American Society for Metals, 1989.

- [22] D. A. Stephenson y J. S. Agapiou, *Metal Cutting Theory and Practice*, 1997, p. 189.
- [23] Sandvick, «Catálogo Sandvik Fresado,» [En línea]. Available: https://www.interempresas.net/FeriaVirtual/Catalogos_y_documentos/4396/MTG_D.pdf. [Último acceso: 01 03 2020].
- [24] S. Kalpakjian y S. R. Schmid, *Manufactura, ingeniería y tecnología*, 5 Edición ed., México: Pearson, 2008.
- [25] R. A. Walsh y D. R. Cormier, *McGraw-Hill machining and metalworking handbook*, The McGraw-Hill Companies, Inc., 2005.
- [26] R. A. Walsh, *Handbook of machinig and metalworking calculations*, USA: McGrawn-Hill, 2001.
- [27] J. Garavito, *Fresado y Taladrado*, 2007.
- [28] The Army Institute for Professional Development (AIPD), *Milling machine operations*, 1988.
- [29] O. Rojas Lazo y L. Rojas Rojas, «Diseño asistido por computador,» *Industrial Data*, vol. 9, nº 1, pp. 7-15, 2006.
- [30] Autodesk, «Autodesk,» 2019. [En línea]. Available: <https://latinoamerica.autodesk.com/solutions/cad-cam>. [Último acceso: 03 Septiembre 2019].
- [31] M. E. Larrea Arias, «Diseño y manufactura asistida por computador (CAD-CAM) en la construcción,» *Researchgate*, p. 81, 2010.
- [32] A. P. Espinoza , J. B. Fernández, J. M. Sierra Soto, J. C. Azofra Rueda y F. J. Martínez de Pisón Ascacíbar, *Prácticas de mecanizado en torno y fresadora*, Rioja: Universidad de La Rioja, 2018.
- [33] ikastaroak.ulhi.net, «DPMCM01.- Procesos de mecanizado por arranque de viruta.,» BirtLh, [En línea]. Available: https://ikastaroak.ulhi.net/edu/es/PPFM/DPMCM/DPMCM01/es_PPFM_DP MCM01_Contenidos/website_index.html. [Último acceso: 3 Abril 2020].
- [34] J. G. Chanataxi Gualotuña y R. X. Villacis Arce, *Determinación de estrategias de mecanizado tres ejes de superficies cóncavas y convexas en aluminio EN-AW-7075*, Quito, 2018.

- [35] J. A. Ortiz Marzo, Contribución al estudio de la rugosidad superficial, obtenida mediante el proceso de fresado en alta velocidad, en la fase de acabado, de aceros templados, de moldes y matrices, Barcelona, 2018.
- [36] J. M. Calvario Heredero, Mecanizado de un Componente de Transmisión, Cadíz, 2007.
- [37] S. Krar y A. Gill, Computer numerical control programming basics, New York: Industril Press Inc..
- [38] Siemens, «Siemens,» [En línea]. Available: https://docs.plm.automation.siemens.com/tdoc/nx/12/nx_help#uid:contour_drive_fv_boundry_pttrn. [Último acceso: 29 03 2020].
- [39] ASM International Handbook Committee, ASM Handbook Volume 16 Machining, ASM, 1989.
- [40] Grupo de tecnología, «Procesos de fabricación,» 2019. [En línea]. Available: <http://www3.fi.mdp.edu.ar/tecnologia/archivos/TecFab/10.pdf>. [Último acceso: 05 Septiembre 2019].
- [41] AENOR, UNE-EN ISO1302, España-Madrid: AENOR, 2002.
- [42] E. Clemente Rodríguez, «Influencia de parámetros de corte y vibraciones en la rugosidad superficial en procesos de torneado,» Sevilla, 2015.
- [43] E. Baró Gadea , Estudio de la rugosidad superficial mediante fresado, Barcelona, 2012.
- [44] Dormer, Technical Handbook, Seoul, 2013.
- [45] TyP Mediciones, «TyP Mediciones,» 2019. [En línea]. Available: <https://www.typmediciones.com/44-rugosimetro>. [Último acceso: 05 sepmtiembre 2019].
- [46] Materiales de Laboratorio, «Materiales de Laboratorio,» 2020. [En línea]. Available: <https://materialeslaboratorio.com/rugosimetro/>. [Último acceso: 02 03 2020].
- [47] H. Gutiérrez Pulido, Análisis y diseño de Experimentos, Guadalajara : McGraw-Hill, 2012.
- [48] D. C. Montgomery, Diseño y Análisis de Experimentos, Arizona: LIMUSA, SA, Douglas c. Montgomery.

- [49] D. D. F. RODRÍGUEZ CANTALEJO, Curso de estadística básica para residentes, Cordoba, 2003.
- [50] R. I. Levin y D. S. Rubin, Estadística para administración y economía, México: Pearson Educación, 2004.
- [51] I. Solis Reyna, J. Márquez Meléndez, E. Cárdenas Cervantes y G. Armijo Wong, «Gestiopolis,» 14 Marzo 2008. [En línea]. Available: <https://www.gestiopolis.com/distribuciones-de-probabilidad-y-como-calcularlas-con-minitab/>. [Último acceso: 5 Junio 2020].
- [52] A. Díaz Mata, Estadística aplicada a la administración y la economía, México : McGRAW-HILL, 2013.
- [53] D. R. Anderson, D. J. Sweeney y T. A. Williams, Estadística para negocios y economía 11a. ed., Mexico: Cengage Learning, 2012.
- [54] Estadística para ingenieros, México: McGraw-Hill, 2006.
- [55] J. L. Devore, Probabilidad y Estadística para Ingeniería y Ciencias, México: Cengage Learning,, 2008.
- [56] W. Navidi, Estadística para ingenieros, México: McGraw-Hill, 2006.
- [57] C. Forbes, M. Evans, N. Hastings y B. Peacock, Statistical Distributions, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc, 2011.
- [58] Rockwell Automation, Arena User's Guide, U.S.A.: Rockwell Software Inc., 2004.
- [59] J. Gorgas García, N. Cardiel López y J. Zamorano Calvo, Estadística básica para estudiantes de ciencias, Universidad Complutense de Madrid, 2011.
- [60] . D. D. Wackerly, W. Mendenhall III y R. L. Scheaffer, Estadística matemática con aplicaciones, México: Cengage Learning, 2010.
- [61] L. Rodriguez Ojeda, Probabilidad y estadística básica para ingenieros, Guayaquil: ESPOL, 2007.
- [62] Epidat, Distribuciones de Probabilidad, Servizo Galego de Saúde , 2014.
- [63] A. Hou, L. C. Parker, W. E. Harris y D. J. Wilman, «Statistical tools for classifying galaxy group dynamics,» *The Astrophysical Journal* , vol. 702, pp. 1199-1210, 2009.

- [64] G. Solo Fernández, El método taguchi en diseños experimentales, Veracruz, 1996.
- [65] R. K. Roy, A primer on the Taguchi method, USA: Society of Manufacturing Engineers, 2010.
- [66] P. D. Medina V., E. A. Cruz T. y J. H. Restrepo, «Aplicación del modelo de experimentación Taguchi en un ingenio azucarero del Valle del Cauca,» *Scientia et Technica Año XIII*, n° 34, pp. 337-341, 2007.
- [67] H. Gutiérrez Pulido y R. Salazar, Análisis y diseño de experimentos, México: McGraw-Hill, 2008.
- [68] A. M. Pinar, «Optimization of Process Parameters with Minimum Surface Roughness in the Pocket Machining of AA5083 Aluminum Alloy via Taguchi Method,» *Arabian Journal for Science and Engineering*, vol. 38, pp. 705-714, 2013.
- [69] P. Ross, Taguchi techniques for quality engineering, USA: McGraw-Hill Education, 1995.
- [70] J. M. Cimbala, Taguchi Orthogonal Arrays, Pensilvania, 2014.
- [71] G. T. Smith, Cutting Tool Technology Industrial Handbook, New Delhi: Springer, 2008.
- [72] M. E. MAIER, «EMCO Concept Mill 260, Centro de Mecanizado vertical controlado por PC,» vol. II, n° 1, pp. 1-82, 2015.
- [73] Mitutoyo, «shop.mitutoyo,» [En línea]. Available: [https://shop.mitutoyo.eu/web/mitutoyo/es/mitutoyo/1292249246959/Rugos%20admetro%20de%20superficies%20Surfest%20SJ-210/\\$catalogue/mitutoyoData/PR/178-560-01D/index.xhtml](https://shop.mitutoyo.eu/web/mitutoyo/es/mitutoyo/1292249246959/Rugos%20admetro%20de%20superficies%20Surfest%20SJ-210/$catalogue/mitutoyoData/PR/178-560-01D/index.xhtml). [Último acceso: 12 03 2020].
- [74] Inspec, «inspec-inc,» 2014. [En línea]. Available: <https://www.inspec-inc.com/docs/default-source/individual-equipment-brochures/surfest-sj-210.pdf?sfvrsn=2>. [Último acceso: 12 03 2020].
- [75] Mitsubishi Materials Corporation, Fresado Integral, Alemania, 2019.

- [76] DURIT HARTMETALL GMBH 2019, «Durit Metal duro,» 2019. [En línea]. Available: <https://www.durit.com/es/tecnologia/conocimiento/>. [Último acceso: 17 Abril 2020].
- [77] A. Aggarwal, H. Singh, P. Kumar y M. Singh, «Optimizing power consumption for CNC turned parts using response surface methodology and Taguchi's technique—A comparative analysis,» *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 200, pp. 373-384, 2008.
- [78] F. Kolahan, R. Gomezerji y M. Moghaddam Azadi, «Application of Taguchi Method Grey Analysis and ANOVA in Optimization of Titanium Alloys Milling,» *3rd International Conference on Manufacturing Engineering*, 2011.
- [79] L. C. Juiña, R. X. Villacis Arce, J. G. Chanataxi Gualotuña, V. H. Cabrera, N. V. Moreno y C. A. Anrango, «Determinación de Estrategias de Mecanizado Tres Ejes de Superficies Cóncavas y Convexas en Aluminio EN-AW-7075n,» *Ingeniería Mecánica Tecnología y Desarrollo*, vol. 6, nº 3, pp. 79-86, 2018.
- [80] I. Zagórski, M. Kulisz, M. Klonica y J. Matuszak, «Trochoidal Milling and Neural Networks Simulation of Magnesium Alloys,» *Materials*, 2019.
- [81] J. J. Marulanda Durango, A. Alzate Gómez, C. D. Sepúlveda Londoño y M. Holguín Londoño, «Regularización de Tikhonov para estimar los parámetros de un modelo de un horno de arco,» *Tecnura: Tecnología y Cultura Afirmando el Conocimiento*, vol. 17, nº 37, pp. 41-52, 2013.
- [82] R. E. Walpole, R. H. Myers, S. L. Myers y K. Ye, Probabilidad y estadística para ciencias e ingeniería, México: Pearson Educación, 2012.

ANEXO

Anexo 1. Valores críticos de D para la prueba de bondad de ajuste de Kolmogorov-Smirnov [50]

Tamaño de muestra, n	Nivel de significancia para $D = \text{máximo } F_e - F_o $				
	0.20	0.15	0.10	0.05	0.01
1	0.900	0.925	0.950	0.975	0.995
2	0.684	0.726	0.776	0.842	0.929
3	0.565	0.597	0.642	0.708	0.828
4	0.494	0.525	0.564	0.624	0.733
5	0.446	0.474	0.510	0.565	0.669
6	0.410	0.436	0.470	0.521	0.618
7	0.381	0.405	0.438	0.486	0.577
8	0.358	0.381	0.411	0.457	0.543
9	0.339	0.360	0.388	0.432	0.514
10	0.322	0.342	0.368	0.410	0.490
11	0.307	0.326	0.352	0.391	0.468
12	0.295	0.313	0.338	0.375	0.450
13	0.284	0.302	0.325	0.361	0.433
14	0.274	0.292	0.314	0.349	0.418
15	0.266	0.283	0.304	0.338	0.404
16	0.258	0.274	0.295	0.328	0.392
17	0.250	0.266	0.286	0.318	0.381
18	0.244	0.259	0.278	0.309	0.371
19	0.237	0.252	0.272	0.301	0.363
20	0.231	0.246	0.264	0.294	0.356
25	0.21	0.22	0.24	0.27	0.32
30	0.19	0.20	0.22	0.24	0.29
35	0.18	0.19	0.21	0.23	0.27
más de 35	$\frac{1.07}{\sqrt{n}}$	$\frac{1.14}{\sqrt{n}}$	$\frac{1.22}{\sqrt{n}}$	$\frac{1.36}{\sqrt{n}}$	$\frac{1.63}{\sqrt{n}}$